REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE 20 AOUT SKIKDA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N^0 d'ordre :
Série :

MEMOIRE DE MAGISTERE

Option : Géo matériaux

Thème :

CONTRIBUTION A L'ETUDE RHEOLOGIQUE D'UN BETON A HAUTES PERFORMANCES (BHP) LOCAL

Présenté par :
MENNAAI AMOR

Soutenu le :

Devant le jury :

Président:	**Mr. M.BELACHIA**	Prof. U.	de Skikda
Rapporteur :	**Mr. M.N. GUETTECHE**	M.C. U.	de Constantine
Examinateur:	**Mr. M.HIDJEB**	M.C. U.	de Skikda
Examinateur:	**Mr. A.BEROUAL**	M.C. U.	de Constantine

MEMBRE INVITE
Madame : CHIBANE M.L Université de Constantine

REMERCIMENTS

Au terme de ce travail, je remercie le **DIEU** tout puissant qui m'a donné la for ce et la volonté d'achever cette réalisation et nous lui rendons grâce.

Ce travail d'initiation à la recherche a été réalisé au Laboratoire de Recherche en Génie Civil à l'Université Mentouri de Constantine.

J'adresse, en premier lieu, mes vifs remerciements à mon encadreur Dr. **M. N. Guetteche,** Maître de conférence à l'Université Mentouri de Constantine, qui m'a proposé ce thème et m'a initié dans cette voie de recherche. J'avoue qu'il a toujours été présent, compétent et surtout efficace dans sa supervision. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus dévouée. .

Je tiens à exprimer mes remerciement les plus sincères au Professeur **M. Belachia** de l'Université de Skikda pour ses conseils avisés, et d'avoir accepter de participer le précédant à ce Jury.

Mes remerciements vont également Monsieur **BEROUAL Ahmed**, Maître de Conférences à l'Université de Constantine, d'avoir participer au Jury.

Très sensiblement a l'honneur que ma fait Monsieur **M. HIDJEB**, Maître de Conférences à l'université de Skikda, en acceptant de participer à ce jury et à qui je tiens à exprimer tous mes remerciements.

Je n'oublie pas de remercier :

Que Monsieur **M- DJEBABRA** Professeur à l'université de Batna et président du comité scientifique du département de génie sécurité, trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour son aide,et ses encouragement.

- Mr Beghoul Majid, Directeur de la Carrière **ENG**, d'avoir supporte mes travaux par ses aides précieuses.
- Les techniciens du Laboratoire de **CTC** de Constantine qui, par leurs connaissances et leurs maîtrises du matériel, m'ont permis de réaliser tous les essais souhaités de cette recherche et l'équipe du Granitex. Qu'ils en soient tous remerciés.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué de loin ou du près au bon déroulement de mes travaux. Que Monsieur **S. BENSEBTI, M. A. CHABANE et MIMI** trouvent toute ma sympathie.

Je ne pourrait oublier de remercier tous mes collègues et personnel du Département de Génie Civil pour leur encouragement et l'ambiance de travail qu'il ont toujours manifesté.

Finalement, je voudrais remercier mes parents, mes fières et mes sœurs qui m'ont encouragé, sans relâche, à poursuivre mes études et mes travaux. C'est à eux que je dédie ce mémoire.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

RESUME

Les travaux effectués dans le cadre de ce mémoire concernent l'étude sur le béton qui reste de nos jours le matériau le plus utilisé dans la construction. Aussi des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles, dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance. Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, tell que adjuvants et additions fines.

L'objectif principal de notre travail est de contribuer à la rhéologique d'une étude de béton à hautes performances. Ce travail permet de compléter les études sur la formulation des BHP. La substitution d'un pourcentage du ciment, par des additions fines avec l'utilisation des fluidifiants, permet d'améliorer la résistance mécanique de 28 à 90 jours. Les problèmes de durabilité du matériau ainsi que la taille et la répartition des pores a une grande influence sur la résistance mécanique des pâtes de ciment hydratées et par conséquent sur les performances des bétons utilisés dans la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

Mots clés : ***caractérisation, rhéologie, bétons à hautes performances, résistance mécanique, additions, adjuvants***.

Abstract:

Works done in the setting of the memory concerner the survey on the concrete that remains in our days the material the most used in the construction. Also the studies and discoveries do not stop conferring it performances and new faculties, in the goal to find a compromise between the practice and the resistance. The worries of the constructors are to succeed to reach high performance or resistance with a judicious choice of the materials and the addition of new products, as adjuvant and refined additions.

The main objective of work is to contribute to the rheology of a high performance concrete study to. This work permits to complete the studies on the formulation of the **BHP**. The substitution of a percentage of the cement, by refined additions with the use of fluids, permits to improve the mechanical resistance from **28** to **90** days. The problems of durability of the material as well as the size and the distribution of the pores has a big influence on the mechanical resistance of the hydrated cement dough's and therefore on the performance of concrete used in the construction of the buildings and the works of civil engineering.

Key words: ***characterization, rheology, concrete of high performance, mechanical resistance, additions, adjuvant.***

ملخص

في إطار انجاز هذه المذكرة التي تحمل دراسة الخرسانة و التي تعتبر الخرسانة في يومنا هذا المادة الأكثر في مجال البناءات . أيضا الدراسات و الاكتشافات المتواصلة أدت إلى السعة و الجودة العالية ضمن الحصول على حل وسط بين الحالتين الحالة الجديدة الصب و في الحالة الصلبة المقاومة.

بالرغم من ذالك فان الجهود و البحوث في مجال البناءات أفضت إلى الجودة و المقاومة العالية مع اختيار النوعية الصائبة للمواد مع إدخال مواد جديدة, مثل إضافات الدقيقة و مواد كيماوية.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو كيفية المساهمة الريوليجية في دراسة الخرسانة ذات و المقاومة العالية .

هذا العمل يسمح لنا بالدراسة حول كيفية إنشاء الخرسانة ذات و المقاومة العالية. إن إنقاص نسبة من الاسمنت و تعويضها بالإضافات الدقيقة مع إدخال مواد كيماوية ينتج لنا الحصول على المقاومة الميكانيكية من 28 إلي اليوم 90.

إن مشاكل الصلابة أو دوام الحياة بالنسبة المواد و أيضا حجمها وتوزيعها يشكل تأثيرا كبيرا على المقاومة الميكانيكية للخرسانة و بصوره مباشره على جوده الخرسانة المستعملة في مجال البناءات.

كلمات مفتاحيه : الخصائص ; الريولوجي ; الخرسانة ذات الجودة العالية ; المقاومة الميكانيكية ; الإضافات الدقيقة ; المولد الكيماوية.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE..... *01*

CHAPITRE I : CRACTERISYIQUES SUR LES BETONS A HAUTRS PERFORMANCES

Page

I.1. Introduction *03*
1.2 Perspectives et historiques *04*
I.3 Les voies d'obtention des hautes performances..... *09*
A/ Défloculation des grains de ciment..... *09*
B/ Extension du spectre du mélange granulaire..... *09*
I.3.1 Les principes des BHP *10*
I.3.2Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté..... *10*
I. 3.2.1 Porosité *11*
I.3.2.2 Diminution de la taille des graines des produits d'hydratation..... *13*
I.3.3 Composition des bétons à hautes performances..... *13*
I.3.4 Choix des matériaux *14*
I.3.4.1 Sélection du ciment..... *14*
A/ Fabrication et composition chimique du ciment portland..... *15*
B/ Equations de BOGUE..... *16*
C/ L'hydratation du ciment Portland..... *17*
D/ L'eau dans la pâte de ciment..... *18*
I.3.4.2 Sélection du Superplastifiants..... *18*
A/ Définition..... *18*
B/ Modes d'action..... *18*
C/ fonctions..... *19*
I.3.4.2.1 Super plastifiants à base de mélamine..... *20*
I.3.4.2.2 Super plastifiants à base de naphtalène..... *21*
I.3.4.2.3 Super plastifiants à base de lignosulfonate..... *21*
I.3.4.3 La définition des types des superplastifiants et relation avec leur fonction dans béton..... *22*
I.3.4.4 Sélectin du liant pour les BHP *23*
I.3.4.5 Composition de quelques bétons rencontrés dans la littérature..... *24*
I.3.4.5.1.1 BHP confectionné par Haque (1998) *24*
I.3.4.5.1.2 BHP confectionné par Wang (1999) *24*
I.3.4.5.3 Autres BHP..... *25*
I.3.4.5.4 Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des BHP..... *27*
I.3.4.5.5 Les additions normalisées pour les BHP..... *28*
A/ Les ajouts inertes..... *29*
B/ Les ajouts actifs..... *29*
I.3.4.5.5.1 Fumée de silice NF P 18-502..... *29*
I.3.4.5.5.2 Pouzzolanes ASTM 618-94..... *30*
A/ Matériaux Pouzzolaniques..... *30*
B/ Pouzzolanes naturelles..... *31*
C/ Pouzzolane artificielle..... *31*
D/ Pouzzolanes et pouzzolanicité..... *31*
I.3.4.5.5.3 Le laitier à haut fourneau NF P18-506..... *32*

A/ Laitier vitrifier moulu de haut fourneau NF P 18-506…….. 33
B/ Composition chimique du laitier…… 33
C/ Hydraulicite du Laitier Vitrifie…….. 34
I.3.4.5.5.4 Fillers de Calcaire…… 34
A/ L'effet fillers……. 35
I.3.4.6 Optimiser les granulats résistants…… 35
I.3.4.6.1 Granulat fin…… 36
I.3.4.6.2 La forme, l'état de surface et l'origine…….. 36
I.4 Conclusion…….. 37

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MARERIAUX UTILIES.

Page

II.1 Introduction …….. 38
II.2 Le ciment NF P 15-301……..... 38
II.3 Caractéristiques des granulats …… 39
II.3.1 Essais sur granulats …… 39
II.3.1.1 Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598) ……... 39
II.3.1.2 Module de finesse (NF P 18-304)…….. 39
II.3.1.3 Masse volumique …….. 40
II.3.1.4 Coefficient d'aplatissement (Norme NF P 18-561) …….. 40
II.3.1.5 Coefficient d'absorption des granulats …….. 40
II.3.1.6 Essai Los Angeles (NF P 18-573) …… 41
II.3.1 .7 Caractéristiques de la roche …… 42
II.4 Caractérisation des additions fines …… 42
II.4. 1 Caractéristiques des fumées de silice …… 42
II.4. 1.1 Mode d'action des fumées de silice dans le béton…….. …… 43
A/ Effet physique…… …… 43
B/ Effet pouzzolanique.. …… 43
II.4.1.2 Dosage en fumée de silice …….. 44
II.4. 2 Caractéristiques de pouzzolane NF EN 1858……..... 45
II.4. 2.1 Mode d'action des Pouzzolanes dans le béton ……. 45
II.4. 2.2 Les propriétés physiques …….. 45
II.4. 2.3 La pouzzolane naturelle NF P18-308……..... 45
II.4. 2.4 Réactivité……..... 46
II.4. 3 Caractéristiques de laitier à haut fourneau NF P 18-506…….. 47
II.4. 3.1 Différents modes d'activation chimique et produits d'hydratation …….. 47
II.4. 3.2 Les normes appliquées en Algérie …….. 47
II.4. 3.3 Quelques propriétés physiques du laitier…….. 48
II.4. 3.4 Propriétés physiques du laitier granule broye …….. 49
II.4. 3.5 Propriétés chimiques du laitier granule broye …… 49
II.4. 3.6 Dosage du laitier à haut fourneau …… 50
II.4. 4 Caractéristiques Filler de calcaire NFP 18-508…… 50
II.4. 4.1 Principale utilisation …… 51
II.4. 4.2 Conditionnement……..... 52
II. 5 Super plastifiant– haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2…….. 52
II. 5 1 Description…… 52
II. 5.2 Caractéristiques……..... 52

II. 5.3 Propriétés et Effets…….... 52
II. 5.4 Dosage …….. 53
II. 5.5 Mode d'emploi …….. 53
II. 5.6 Conditionnement et stockage…….. 53
II. 5 .7 Essais de laboratoire……..... 53
II.6L'eaude Gâchage…….. 53
II. 6.1 Technique des essais :Norme NF P 18-303…… 53
A/ Physiques …… 53
B/ Chimiques…… 54
II. 6. 2 Méthodes d'analyse d'eau……... 54
II. 6 .3 Prélèvement des échantillons d'eau…… 54
II. 6. 4 Essai de l'acidité de l'eau…… 54
II. 6 .5 Essai des sulfates contenus dans l' eau……..... 54
II .7. Conclusion……..... 56

CHAPITRE III : RHEOLOGIE DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

Page

III.1 Introduction…….. 57
III.2 Méthodes d'optimisation des coulis de ciment…….. 57
III.2.1 Fluidité (viscosité)…….. 58
III.2.2 Résistance en compression…… 58
III.2.3 L'Approche de mesure de fluidité au Cône de Marsh «NF P 18-358»…….. 59
III.3.Méthodes des coulis……..... 60
III.3.1 Méthode canadienne……... 60
III.3.2 Méthode Française (L.C.P.C)……..... 61
III.4 Programme expérimental adopté.…… 61
III.4 .1 Méthode du cône Marsh…… 62
III.4.2 Préparation de l'échantillon et mesure du temps d'écoulement…… 62
A) Préparation des coulis…… 62
B) Influence sur le moment d'addition du Superplastifiant dans le béton……. 64
III.4.3 Point de saturation…….. 64
III.4.3.1Différents comportements rhéologiques……..... 66
III.4.3.2 Détermination de l'effet maximal absolu d'un adjuvant dispersant……... 67
III.4.3.3 Influence de la séquence d'introduction du Superplastifiant……..... 68
III.4.4 La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke……... 70
III.4.4.1 Rapport eau/liant…… 70
III.4.4.2 Dosage en eau……..... 71
III.4.4.3 Dosage en Superplastifiants…….. … 72
III.4.4.4 Procédure expérimentale…… 72
a) Première mélange…… 72
b) Deuxième mélange……..... 74
c) Troisième mélange……... 75
d) Quatrième mélange…… . 77
e) Cinquième mélange……... .. 79
III.5.Conclusion…… 80

CHAPITRE IV : COMPOSITION DU BETON A HAUTES PERFORMANCES

Page

IV.1. Introduction…… *81*

IV.2. Les bétons à Hautes Performances (BHP)…… *81*

IV.2.1. Fluidité …… *82*

IV.2.2. Résistance mécanique élevée au jeune âge…….. *82*

IV.2.3. Diminution de la porosité de la matrice cimentaire…….. *82*

IV.2.4. Optimisation de l'empilement granulaire…….. *84*

IV.2.5 Le matériau aux multiples performances…….. *84*

a) À l'état frais…….. *84*

b) A l'état durci…… *84*

IV.2.6 Rapport eau/ciment…… *85*

IV.3. Méthodes d'essais adoptées…… *87*

IV.3.1 Essais sur béton frais…….. *87*

IV.3.1.1 Mesure de l'affaissement (NF P 18-415)……..... *87*

IV.3.1.2 Principe de l'essai…… *87*

IV.3.1.3 Les classes de consistance…….. *87*

IV.3.1.4 Masse volumique à l'état frais…… *88*

IV.3.2 Essais mécaniques…… *88*

IV.3.2 .1Essai de compression (NF P 18-406)…….. *88*

IV.3.3 Les étapes de la formulation…… *88*

IV.3.3.1 L'optimisation de la formulation d'un BHP……..…. *89*

IV.3.3.2 Résistances mécaniques…….. *89*

IV.3.3.3 Module d'élasticité…….. *90*

IV. 4. Démarches expérimentales…… *91*

IV. 4.1 Optimisation du squelette granulaire (méthode DREUX-GORISSE)…….. *91*

IV.4.2 Courbe granulaire de référence OAB……..... *91*

IV.4.3 Confection du béton à haute performance …… *93*

IV.4.4 résistance à la traction…….. *99*

IV.5. Discussions et interprétations…… *102*

Conclusion générale…….. *104*

ANNEX A…….. *106*

A.I- Notation adoptée des coulis…… *107*

A.II Démarches expérimentales adoptées…….. ***108***
A.III Choix du coulis de référence……. ***108***
A.III.1 Les coulis sans additions et sans fluidifient…….. ***108***
A.III.2 Les coulis avec additions fines calcaires sans fluidifiant…….. ***108***
A.III.3 Les coulis avec fluidifiant……..... ***110***
A. III.3.1 Dosage en superplastifiant des coulis hautes performances……..... ***110***
A. III.4 Coulis fluidifiant avec additions fines……..... ***110***
ANNEXES B……..... ***113***
B.I Mesure du temps d'écoulement…… ***114***
B.II Première série d'essai …….. ***114***
B.III Deuxième série d'essai ……. ***115***
B.IV Troisième série d'essai……..... ***117***
B.V Quatrième série d'essai……... ***118***

Référence Bibliographe…….

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : *page*

Tableau I-1- Les différentes classes de BHP ……..…… *14*
Tableau I-2 - Formule chimique et abréviation des quatre principaux constituants du ciment… *17*
Tableau I-3- Les fonctions principale et secondaires d'un adjuvant…… *19*
Tableau I-4 - Les caractéristiques des adjuvants en relation avec leur fonction…….. *22*
Tableau I-5- Résistance en compression des BHP aux cendres volantes (sur des cubes de *200mm* de coté)…….... *24*
Tableau I-6- Formulation d'un BHP de résistance100MPa…….. *25*
Tableau I-7- Composition de BHP dans certains pays ……..…… *26*
Tableau I-8- Compositions et propriétés du béton frais……... *27*
Tableau I-9- Composition des bétons étudiés……. *28*
Tableau I-10-Varaition de la masse volumique en fonction du temps …….. *28*
Tableau I-11- évaluation de la résistance à la compression…….. *28*

Chapitre II : *page*

Tableau II-1- Composition chimique du clinker ……..... .. *38*
Tableau II-2- Composition minéralogique du clinker produit à l'E.R.C.E d'EL-Hamma ……... *38*
Tableau II-3- propriétés physiques du ciment …… *39*
TableauII-4- Résistance mécaniques du ciment (bars)…… *39*
Tableau II-5- Caractéristiques chimiques des granulats utilisés..…….. *41*
Tableau II-6- Caractéristiques mécaniques et physiques des granulats utilisés ……..... *41*
Tableau II-7- Caractéristiques physiques de la roche …… *42*
Tableau II-8- Caractéristiques mécanique de la roche ……..... *42*
Tableau II-9- Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice …… *44*
Tableau II-10- Caractéristiques physiques de la fumée de silice …… *44*
Tableaux II-11- caractéristiques chimiques de pouzzolane……... …….... *45*
Tableau II-12- caractéristiques physiques de pouzzolane ……... *46*
Tableau II-13 -les propriétes de laitier et leur fonction……. *48*
Tableau II-14- Temps de broyage et surface blaine du laitier vitrifié …….. *49*
Tableau II.14- Caractéristique physique de laitier vitrifié …… *49*
Tableau II-15- Caractéristique chimique de laitier vitrifié ……..... *49*
Tableau II-16- L'activité hydraulique du laitier …… *49*
Tableau II-17- Les caractéristiques physiques et chimiques de filler …….... *51*
Tableau II-18 - les propriétés de super plastifiant sur le béton …….. *52*
Tableau II.19 – Résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée…….. *53*

Chapitre III : *page*

Tableau III-1- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant sans additions fines… *73*
Tableau III-2- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines laitier et filler de calcaire……. *74*
Tableau III-3- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines laitier et Fumée de silice …….. *76*

Tableau III-4- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines pouzzolanes…… ***78***

Chapitre IV : ***page***

Tableau IV-1- Les différentes classes de consistance..... ***87***
Tableau IV-2- Pourcentages en volume absolu des granulats…….. ***91***
Tableau IV-3- Les volumes absolus de chaque granulat…….. ***92***
Tableau IV-4- Masses des granulats par un mètre cube de béton…… ***92***
Tableau IV-5- Les différents types de dosage en liant avec le point de saturation……... ***93***
Tableau IV-6- La composition massique avec Superplastifiant et sans additions (Kg/m^3)……. ***96***
Tableau IV-7- Résultats d'essai sur bétons à l'état frais et durcis…… ***96***
Tableau IV-8- La composition massique du BHP avec Superplastifiant et additions laitier et filler (Kg/m^3)…….. ***97***
Tableau IV-9- Résultats d'essai sur bétons avec laitier et filler à l'état frais et durcis……..... ***97***
Tableau IV-10 La composition massique du béton sans Superplastifiant et sans additions (Kg/m^3)…….. ***98***
Tableau IV-11 Résultats d'essai sur bétons témoin à l'état frais et durcis…… ***98***
Tableau IV-12 Résultats à la traction sur différents types des bétons avec Superplastifiants et additions fines (laitier+filler)…….. ***99***

LISTES DES FIGURES

Chapitre I : **page**

Figure I-1- Gratte- ciel de la région de Chicago construits avec des bétons à très haute résistance…… ***06***
Figure I-2- Edifice la laurentienne à Montréal. Colonne expérimentale de 119.9MPa…… ***07***
Figure I-3- Le béton à haute résistance se profile à l'horizon des Etats-Unis (tiré de Concrete Technology Today, 1994)…….. ***07***
Figure I-4- Progression de la hauteur des gratte-ciel……... ***08***
Figure I-5- Produits d'hydratation internes…… ***12***
Figure II-6-Produits d'hydradation externes……... ***12***
Figure I-7- representationon schématique de deux pates de ciment fraiches de rapports respectifs de 0,65 et 0,25. Dans cette représentation schématique, le rapport de le surface d'eau et de celle des grains de ciment est égal au rapport massique eau/ciment……. ***13***
Figure I-8- Schéma de fabrication du laitier bouleé…….. ***32***
Figure I-9 -Situation dans le système ternaire *CaO- SiO_2- Al_2O_3* du laitier de haut fourneau….. ***34***

Chapitre II : **page**

Figure II-1 - Triangulation du diagramme ternaire d'hydratation du laitier……..……. ***47***
Figure II-2- Distribution granulométrique des particules……. ***51***
Figure 2.3- Courbe granulométriques des granulats *0/4 ; 4/8 ; 8/16*……. ***55***

Chapitre III : **page**

Figure III-1- Optimisation du dosage en Superplastifiant au cône de Marsh. Temps obtenus pour l'écoulement de 500 ml de coulis un ajustage de 8mm de diamètre sur un ciment contenant 10% de fumée de silice et un Superplastifiant de type polycarboxylate. Le rapport E/L est de 0.32. A droit, schéma du cône de Marsh selon la norme **EN 445**……. ***58***
Figure III-2 - Évolution théorique de la résistance en fonction de la concentration volumique en ciment (à gauche) ou de maniére équivalente en fonction du rapport e/c (à droite)…….. ***59***
Figure III-3 - La rhéopompe…… ***61***
Figure III-4- Le cône Marsh…… ***61***
Figure III-5- Le cône Marsh utilisé à l'université de Sherbrooke……... ***62***
Figure III-6 - un malaxeur de marque {**FORM+TEST SEIDNER**} de capacité 5litres…… ***63***
Figure III-7- Détermination du temps d'écoulement au cône de Marsh……... ***64***
Figure III-8- Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiants……... ***65***
Figure III-9- Temps d'écoulement au cône Marsh pour deux ciments différents…… ***67***
Figure III-10 : Différents types comportement rhéologique pour un coulis de rapport E/C de 0.35 Testé à 22 ^{0}C……. ***68***

Figure III-11 : Défloculation des grains de ciment par l'utilisation d'un fluidifiant ..……. ***69***

Figure III-12 : Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression…. ***70***

Figure III-13 : Détermination du dosage en eau…….. ***71***

Figure III-14- Rapport E/C en fonction de teneurs en superplastifiants avec dosage de ciment 450Kg/m3……... ***72***

Figure III-15- Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants sans additions fines…… ***73***

Figure III-16- Rapport E/L avec 20% de laitier et 10% de filler en fonction de teneurs en superplastifiants…….. ***74***

Figure III-17- Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (20% de laitier et 10% de filler)…… ***75***

Figure III-18- Rapport E/L avec 13% de laitier et 07% de Fumée de silice en fonction de teneurs en superplastifiants……. ***76***

Figure III-19 : Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (13% de laitier et 07% de Fumée de silice)……... ***77***

Figure III-20- Rapport E/L avec 15% de pouzzolane en fonction de teneurs en super plastifiants……... ***78***

Figure III-21 : Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (15% de pouzzolane)……. ***79***

Chapitre IV : **page**

Figure IV-1- Le BHP présente, à l'échelle microscopique, une structure plus fermée qu'un béton courant (grossissement x 5000)…… ***82***

Figure IV-2- Principe de défloculation……..... ***83***

Figure IV-3- Viscosité en fonction du volume de la poudre……. ***83***

Figure IV-4- La floculation augmente le volume apparent des particules fines, défloculation obtenue par les superplastifiants……. ***84***

Figure IV-5- Un organigramme pour l'obtention d'un BHP……..... ***86***

Figure IV-6- Mesure l'affaissement au cône d'abrams…….. ***87***

Figure IV-7 - Pourcentages des granulats et courbe de référence…… ***94***

FigureIV-8- Effet de la séquence d'introduction des matériaux lors du malaxage sur la perte d'affaissement dans le temps (rapporte eau/ciment de 0.25 avec Superplastifiant) …….. ***95***

Figure IV-9 -Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton avec fluidifiant…….. ***97***

Figure IV-10 -Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton avec addition fins et fluidifiant……. ***98***

Figure IV-11-Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton témoins…… ***99***

Figure IV-12 -Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton avec 1.8% de fluidifiant …… ***100***

Figure IV-13-Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton avec 1.8% de fluidifiant avec additions (laitier +filler)…….. ***100***

Figure IV-14 -Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton témoin……... ***101***

LISTE DES PHOTOS *page*

Photo I-1- type Pouzzolane naturelle…….. ***31***
Photo I-2- pouzzolanes rouges calibrées (Carrière EST)…….. ***32***
Photo I-3- Pouzzolane noire (Carrière EST)……... ***32***

LISTE DES TABLEAUX ANNEXES *page*

Tableau A-1 - Désignation des compositions des différents coulis testés……..... ***107***
Tableau A-2- Différents rapports E/C adoptés de pâte pure……..... ***108***
Tableau A-3- Différents coulis avec différentes teneurs en addition fine calcaire……..... ***108***
Tableau A-4 - Différents coulis avec différentes teneurs addition fine pouzzolane……..... ***109***
Tableau A-5- Différents coulis avec différentes teneurs addition fine laitier……..... ***109***
Tableau A-6- Différents composition des coulis fluidifiant, avec différents dosages en superplastifiant……... ***110***
Tableau A-7- Différents compositions coulis avec différentes teneurs en addition fine calcaire et dosage du superplastifiant…….. ***111***
Tableau A-8- Différentes compositions coulis avec différentes teneurs en addition fine pouzzolane et dosage du superplastifiant…….. ***111***
Tableau A-9- Différentes compositions coulis avec différents teneurs en addition fine laitières et dosage du superplastifiant…….. ***112***
Tableau B-1- compositions des coulis pour chaque rapport E/C…….. ***114***
Tableau B-2- Mesure du temps d'écoulement sur les coulis CP…… ***114***
Tableau B-3- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine calcaire…… ***115***
Tableau B-4- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine pouzzolane…….. ***116***
Tableau B-5- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine laitier… ***117***
Tableau B-6- Mesurer le temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant…… ***117***
Tableau B-7- Mesurer du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fin calcaire…….. ***118***
Tableau B-8- Mesurer du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fine pouzzolane……... ***121***
Tableau B-9- Mesurer du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fine laitier……..... ***123***

LISTE DES FIGURES ANNEXES *page*

Figure A-1- Rapport E/C en fonction de teneur en additions fines calcaire…….. ***109***
Figure A-2- Rapport E/C en fonction de teneur en additions fines pouzzolane…… ***109***
Figure A-3- Rapport E/C en fonction de teneur en additions fines laitier……. ***110***
Figure A-4- Rapport E/C en fonction de teneurs en superplastifiant et séries des mélanges…… ***111***
Figure B-1- Le rapport E/C en fonction de temps d'écoulement……... ***114***
Figure B-2- Le rapport E/C en fonction de temps d'écoulement des coulis avec5% addition calcaire…… ***115***
Figure B-3- Le rapport E/C en fonction de temps d'écoulement des coulis avec10% addition calcaire…… ***116***
Figure B-4- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec15% addition calcaire…… ***116***
Figure B-5- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec05% addition pouzzolane et avec fluidifiant……. ***121***
Figure B-6- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec10% addition pouzzolane et avec fluidifiant……. ***122***
Figure B-7- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec15% addition pouzzolane et avec fluidifiant……. ***122***
Figure B-8- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 05% addition laitier et avec fluidifiant…….. ***124***
Figure B-9- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 10% addition laitier et avec fluidifiant……. ***124***
Figure B-10- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 15% addition laitier et avec fluidifiant…….. ***125***

LISTE DES EQUATIONS *page*

I.1…… ***10***
I.2…… ***11***
I.3…… ***12***
I.4…… ***12***
I.5…… ***12***
II.1…… ***39***
II.2…… ***40***
II.3…… ***41***
III.1…… ***58***
IV.1…… ***88***
IV.2…… ***88***
IV.3…… ***90***
IV.4…… ***90***
IV.5…… ***90***
IV.6…… ***90***
IV.7…… ***90***
IV.8…… ***90***
IV.9…… ***90***
IV.10…… ***90***
IV.11…… ***91***
IV.12…… ***91***

NOTATIONS DE LA CHIMIE CIMENTIER

Les notations chimiques abrégées les plus souvent utilisées dans l'industrie du ciment ainsi que dans la suite de ce document, sont données :

H : H_2O	L'eau.
Constituants Chimiques	
C : CaO	Chaux.
S : SiO_2	Slice.
A: Al_2O_3	Alumine.
F: Fe_2O_3	Oxyde ferrique.
N : Na_2O	L'oxyde de sodium.
K : K_2O	L'oxyde de potassium.
Na_2O+K_2O	Les alcalis.
M : MgO	Magnésie.
$CaSO_4$	Sulfate de calcium (anhydrite).
$CaSO_4.1/2H_2O$	Sulfate de calcium (hemihydrate).
$CaSO_4$ $2H_2O$	Sulfate de calcium (gypse)
SO_3	Trioxyde de soufre (sulfates).
CaO (T)	Chaux total.
CaO (L)	Chaux libre.
$CaCO_3$	Carbonate de calcium.
$MgCO_3$	Carbonate de magnésium.
I	L'indice d'hydraulicité ou indice de (VICAT).
CI	Chlorure.
Constituants hydrauliques	
C_3S:$3CaOSiO_2$	Silicate tricalcique.
C_2S: $2Ca\ SiO_2$	Silicate bicalcique.
C_3A:$3CaOAl_2O_3$	Aluminate tricalcique.
C_4AF:$4CaOAl_2O_3$ Fe_3O_4	Alumino-ferrite tétracalcique.
C*:	Ca0 (total) – CaO (libre) - 1.27 CO2 - O, 7 SO3
S* :	SiO2 (total) - Si02 (non combinée)
CO_2	Oxyde de carbone.
Notation conventionnelle des constituants	
K	Clinker.
Z → **Q** ↘ **P**	Pouzzolanes naturelles (matériaux traités thermiquement). Pouzzolanes naturelles (d'origine volcanique).
D	Laitier granulé de haut fourneau.
F S ou D	Fumées de silice.
V	Cendres Volantes siliceuses.
W	Cendres volantes calciques.
T	Schistes calcinés.
L	Calcaire.
F	Fillers (constituant secondaire).
Hum (H_2O%)	Humidité.
SSB	Surface Spécifique Blaine.
RI	Résidu insoluble (non combinée).
PF	Perte au feu à 1000C°.

$\mathbf{T_f}$	Temps de fin de prise.
$\mathbf{T_i}$	Début prise.
$\mathbf{T_D}$	Temps de prise.
$\mathbf{T_b}$	Temps de broyage (heures).
$\mathbf{p_c}$	La masse volumique du ciment.
E	Expansion à chaux.
$\mathbf{v_a}$	Le volume d'air présent dans le coulis.
$\mathbf{f_{tj}}$	résistance caractéristique à la traction.
$\mathbf{f_{cj}}$	Résistance mécanique.
E ij	Le module d'élasticité.
σ c	Contrainte de rupture **(MPa).**
P	Charge de rupture **(MN)**.
S	Section de l'éprouvette.
$\mathbf{M_f}$	Module de finesse pour le sable.
$\mathbf{A_f}$	Affaissement du béton.
$\mathbf{M_{vbf}}$	La masse volumique du béton frais.
$\mathbf{M_T}$	La masse de Peser le récipient.
M	La masse d'un échantillon de béton frais **(kg)**.
V	Volume d'un récipient
ρ_s	Masse volumique absolue (sable).
$\rho_{G1} = \rho_{G2}$	Masse volumique absolue (gravier 4/8 et 8/16).
ρ_c	Masse volumique absolue (ciment).
ρ_f	Masse volumique apparente (Fumée de silice).
ρ	La densité
LA	Los Angeles.
Ab (%)	Le coefficient d'absorption des granulats.
$\mathbf{M_1}$	Poids de l'échantillon séché.
$\mathbf{M_2}$	Poids de l'échantillon après saturation.
A	Le coefficient d'aplatissement.
ES	L'équivalent de sable.
I	Indice d'efficacité hydraulique, **NF P 18-506** (laitier de haut fourneau).
i	Indice d'activité **P 18-508** (Additions calcaires).
C/SP	Le rapport entre le ciment et le superplastifiant.
$\mathbf{L_{EQ}}$	Quantité de liant équivalent.
K	Coefficient affecté à l'addition.
A	Coefficient affecté à l'addition.
C	Quantité d'un ciment.
E	Quantité d'eau.
S	Sable (0/4).
$\mathbf{G_1}$	Gravier (4/8).
$\mathbf{G_2}$	Gravier (8/16).
E/C	Le rapport eau/ciment.
E/L	Le rapport eau/liant.
SP	Superplastifints
X(XRF)	La spectrométrie par fluorescence.
X (DIEUX)	La diffraction des rayons.
X SITU	La spectrométrie infrarouge à transformée de fourrer.

ATD	Analyse Thermique Différentielle.
MEB	La microscopie électronique à balayage.
Types des ciments	
CPA-CEM I	Ciment Portland.
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland Composé (classe A).
CPJ- CEM II/B	Ciment Portland Composé (classe B).
CHF-CEM III/A	Ciment de haut fourneau (classe A).
CHF-CEM III/B	Ciment de haut fourneau (classe B).
CHF-CEM III/C	Ciment de haut fourneau (classe C).
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique (classe A).
CPZ-CEM IV/B	Ciment pouzzolanique (classe B).
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres (classe A).
CLC-CEM V/B	Ciment au laitier et aux cendres (classe B).

INTODUCTION GENERALE

Durant les dernières décennies, plusieurs travaux scientifiques ont été élaboré dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. Aussi, des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance.

Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que adjuvants et additions fines.

L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micro vides de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange et en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, tandis que la deuxième fonction (fonction chimique) concerne la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons ordinaires.

L'objectif de cette étude est d'exposer l'état d'art des BHP[(1)] en s'appuyant sur les aspects qui les rend est semblables ou différents des bétons classiques. L'emploi des nouveaux constituants tels que les super plastifiants et les ultrafines qui ont percé sur le marché a donnée naissance à une nouvelle génération de bétons appelés les BHP.

Notre mémoire se divise en quatre chapitres :

Le première chapitre de ce mémoire est d'abord consacré à une revue bibliographique portant sur l'historique des bétons à très haute résistance de même que sur les principes généraux de fabrication des BHP et les étapes de développement des BHP. Elle traite ensuite le choix des types et la marque des matériaux utilisés pour confectionner un BHP avec des méthodes d'essais et des normes utilisées lors de notre travail de recherche. Même s'il n'existe pas de règle bien établie sur la composition d'un béton à hautes performances, il est utile de présenter quelques types qui ont donné satisfaction. Plusieurs de ces compositions comportent, en plus du ciment Portland et de la fumée de silice, d'autres ajouts minéraux.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés dans notre travail expérimental ainsi que le mode opératoire de chaque essai effectué sur béton frais et durci.

Le troisième chapitre porte sur la rhéologie des coulis et leur caractérisation, dans ce contexte, nous utilisons la méthode du Cône du Marsh. Parmi les essais développés pour la caractérisation de la rhéologie des coulis fluidifier concerne la fluidité des coulis qui rentre dans la formulation des BHP et la compatibilité couple ciment/super plastifiant et l'optimisation le pointe de saturation.

Enfin, dans le quatrième et dernier chapitre est réservé à l'aspect pratique de notre travail. Dans le premier temps, nous présentons le programme expérimentation que nous avons réalisé ainsi que la démarche suivie pour l'élaboration et la formulation du béton à hautes performances et du béton ordinaire témoin. Dans un second temps, nous présentons les résultats obtenus, qui grâce aux essais effectués sur la résistance à la compression et l'évolution la résistance à la traction d'après le BAEL.

(1) **BHP :** Béton à Haute Performance

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

I.1 Introduction

On appelle **Béton à Hautes Performances (BHP)** les bétons hydrauliques ordinaire (Sable + Eau +Graviers +Ciment) auxquels on rajoute des adjuvants (fluidifiant et éventuellement des ultra fines) pour augmenter leur performances, dont la résistance, qui doit dépasser les 60MPa à 28 jours **[01].** Cependant, la résistance à la compression élevée n'est pas la seule et la principale propriété des BHP, car plusieurs autres propriétés se trouvent améliorées, telles que la très faible perméabilité donc une durabilité accrue.

Le BHP apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire citons, à titre d'exemple :

- la maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre,
- la durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions et une meilleure résistance à l'alcali- réaction, une plus grande résistance à l'abrasion et une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel,
- il permet de concevoir des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme.

Cependant, les propriétés améliorées des BHP ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant :

- les granulats doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes,
- l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiant réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tel que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice…. etc.
- l'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m3.

Ces dernières années ont vu l'utilisation de bétons de résistance en compression de plus en plus élevée pouvant aller de 50MPa jusqu'à 400MPa et même de 800MPa en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et des produits spéciaux comme la poudre métallique **[02]**. De telles résistances élevées ont donné une nouvelle classification de bétons, ils sont actuellement appelés bétons à haute résistance (BHR), bétons à hautes performances (BHP), bétons à très hautes performances (BTHP), bétons à poudres réactives (BPR), et bétons fibrés ultra performants (BFUP).

I.2 Historiques et perspectives

Il est obligatoire d'avoir un esprit de pionnier pour se lancer dans le développement des bétons à haute résistance au milieu des années 1960. Pourquoi essayer introduit dans une technique dans le domaine du béton prêt à l'emploi en augmentant la résistance à la compression ?

À cette époque, la plupart des concepteurs étaient tout à fait satisfaits de calculer des structures avec des bétons de 15 à 20MPa. Ces bétons leur étaient bien connus, ils étaient économiques, compétitifs et permettaient de construire des structures de façon sécuritaire.

Au début des années 1960 dans la région de Chicago, les bétons à haute résistance ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures. Même si la résistance des premiers bétons à hautes résistance qui ont alors été développés peut paraître modeste de nos jours, il faut se rappeler qu'à cette époque les bétons usuels avec lesquels on construisait des structures avaient une résistance à la compression essentiellement comprise entre 15 et 30MPa.

Il faut aussi se souvenir que le ciment et les adjuvants qui étaient disponibles à cette époque n'étaient pas aussi performants que ceux dont on dispose à l'heure actuelle pour fabriquer des BHP. La plupart des ciments commerciaux n'étaient pas broyés aussi finement qu'à l'heure actuelle et surtout les réducteurs d'eau commerciaux utilisés à cette époque étaient essentiellement à base de lignosulfonate et ne permettaient de diminuer la quantité d'eau de gâchage que de 8 à 10 %.

Les premiers bétons à haute résistance ont été développés dans un tel contexte historique. De façon à pouvoir mettre en valeur les qualités des bétons à haute résistance, les concepteurs et les producteurs de béton on fait appel à un moyen simple et efficace pour convaincre les propriétaires d'utiliser un tel matériau pour lequel on n'avait aucune expérience et sur lequel on avait finalement très peu de données techniques.

En fait, l'augmentation de la résistance à la compression du béton qui avait pu être obtenue était attribuable à la diminution de la valeur du rapport eau/ciment en sélectionnant des réducteurs d'eau un peu plus efficace que la majorité des produits commerciaux disponible à cette époque. En outre, dans cette recherche visant à diminuer le rapport eau/liant vers des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40, on a commencé à s'apercevoir que le choix du ciment était aussi critique. Le ciment choisi devait bien performer, non seulement d'un point de vue mécanique, mais aussi d'un point de vue rhéologique. Les premiers ciments utilisés pour fabriquer des bétons à haute résistance étaient des ciments de Type I ou de Type II ASTM ou des ciments qualifiés comme Type II modifiés.

De façon à diminuer le plus possible le rapport eau/liant, le dosage en réducteur d'eau était augmenté le plus possible par rapport aux dosages qui étaient normalement utilisé dans des bétons ayant des résistances à la compression de 20 ou 30MPa. Cependant, le dosage en réducteur d'eau ne pouvait être augmenté de beaucoup, car, à ce moment-la, très vite cette augmentation du dosage en réducteur d'eau se traduisait par un retard de prise significatif ou par une quantité d'air entraîné excessive qui, évidemment, diminuait la résistance finale du béton. Les bétons à haute résistance étaient utilisés uniquement dans des applications intérieures **[03]**.

Comme on vient de la voir, le moteur principal du développement des bétons à hautes résistances en Amérique du Nord (figures I.1 ; I.3) a été essentiellement économique, dans le domaine des bâtiments de grande hauteur et porté par des producteurs de béton et des entrepreneurs.

Le contexte est en effet très différent en Europe et plus particulièrement :

- Il y a peu de bâtiments de grande hauteur et leur structure est traditionnellement en béton.
- La séparation historique depuis le XVII^{e} siècle entre les métiers d'ingénieurs et d'architectes a conduit insensiblement ces derniers à délaisser la science des matériaux et des structures.
- On a ainsi vu en France, au cours du XX^{e} siècle le développement du béton précontraint, des ponts à encorbellement avec division matériaux et structures pour ouvrage d'art à joints conjugués, des ouvrages haubanés, de la construction mixte, du passage sous l'impulsion des directions techniques des entreprises et en étroite collaboration avec l'administration française.

Ainsi, l'apparition et le développement des BHP en France se sont essentiellement déroulés au sein du génie civil dans le domaine des ponts et autour de deux entités pionnières :

- L'administration de l'Equipement sous la férue du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées avec la réalisation d'un premier ouvrage d'art en 1984 dans la région de Melun au sud de Paris. Il est remarquable de notre, que dans la communication relative à cette expérience, on trouve pour la première fois sous la plume de Yves MALIER, alors responsable de la division matériaux et structures pour ouvrages d'art au LCPC**,** l'appellation « bétons à hautes performances» au lieu de «haute résistance».

- L'entreprise Bouygues, sous l'impulsion de son directeur scientifique de l'époque, Pierre Richard, avec la réalisation d'un plot d'essai sur la dalle du viaduc SNCF de l'A.86 dans la région parisienne en 1984, puis du pont de l'île de Ré et de l'arche de la défense de 1985 à 1987.

À ce stade, une part importante de la recherche et développement dans le domaine des BHP s'est fédérée autour des Projet Nationaux [(2)].

- le projet national «Voies nouvelles du matériau béton» ;
- puis le projet national «BHP».

Parmi les nombreux apports de ces structures, on peut distinguer :

- l'évolution des règlements de calcul BAEL et BPEL avec une première extension aux B60 en 1994 puis aux B80 en 1999. Cette dernière reposant sur un important travail scientifique en particulier au niveau de retrait et du fluage.

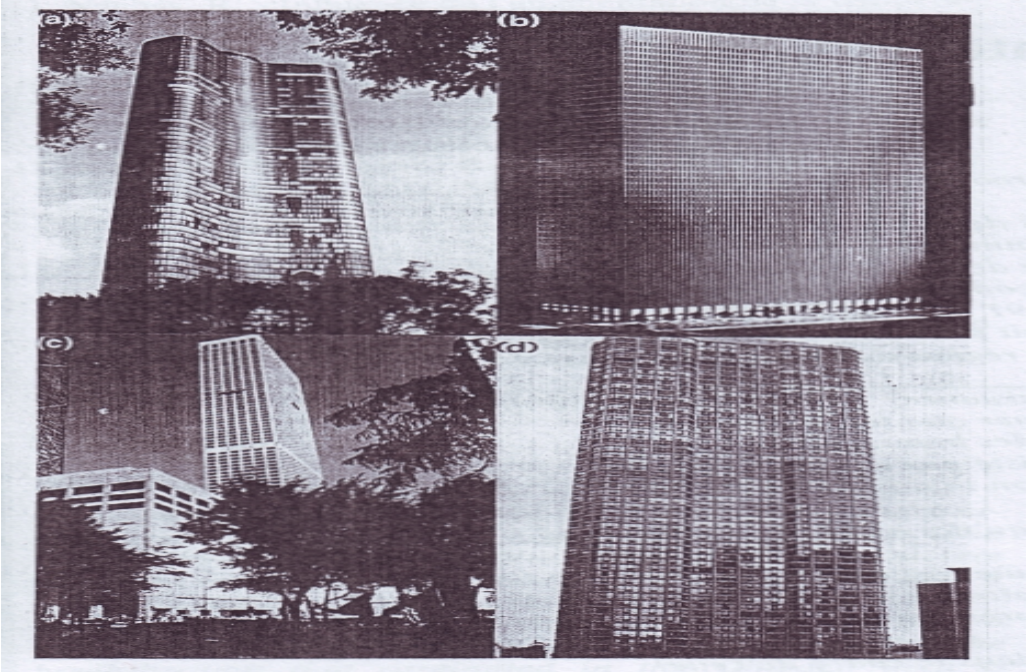


Figure I.1- Gratte- ciel de la région de Chicago construits avec des bétons à très haute résistance [**03**]

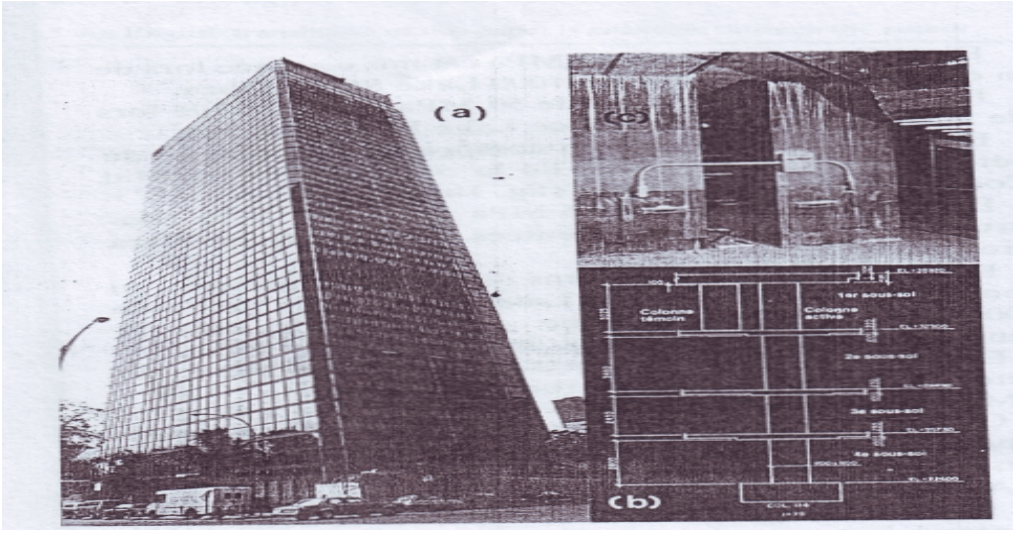


Figure I.2- Edifice la laurentienne à) Montréal. Colonne expérimentale de **119.9MPa [03].**

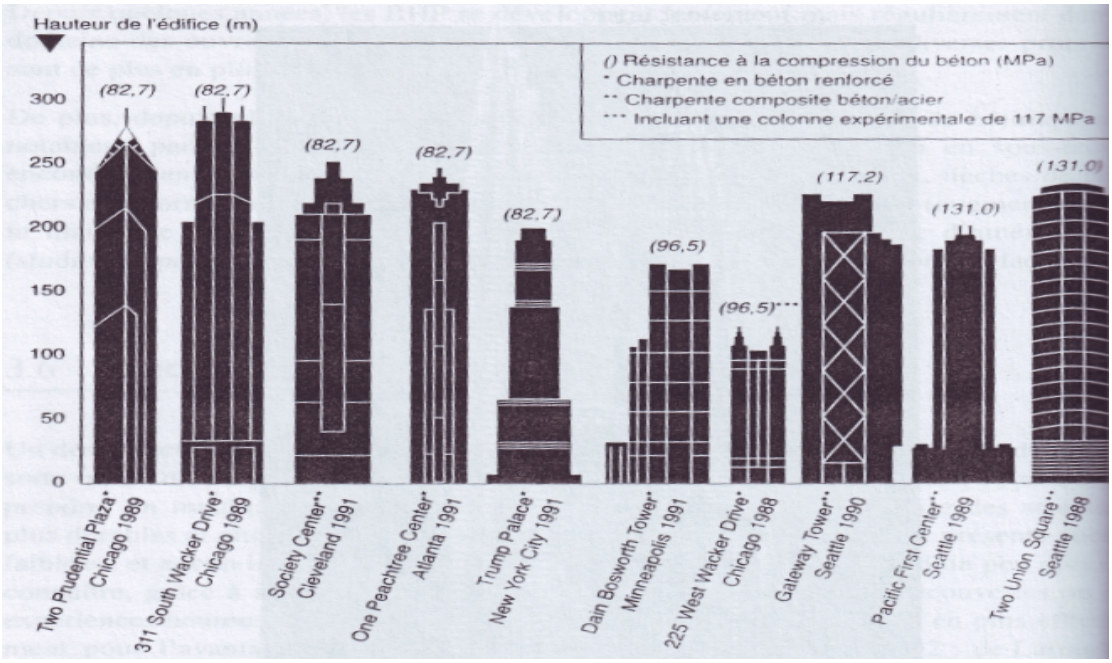


Figure I.3- Le béton à haute résistance se profile à l'horizon des Etats-Unis (tiré de Concrete Technology Today, 1994).

Des gratte-ciel peuvent être construits sur des sols qui ont une capacité portante marginale **[3]**, des piliers et des tabliers de pont peuvent être conçus avec des BHP pour construire des ponts qui sont plus élancés et plus élégants et qui peuvent s'harmoniser beaucoup plusavec le paysage (figure I.4).

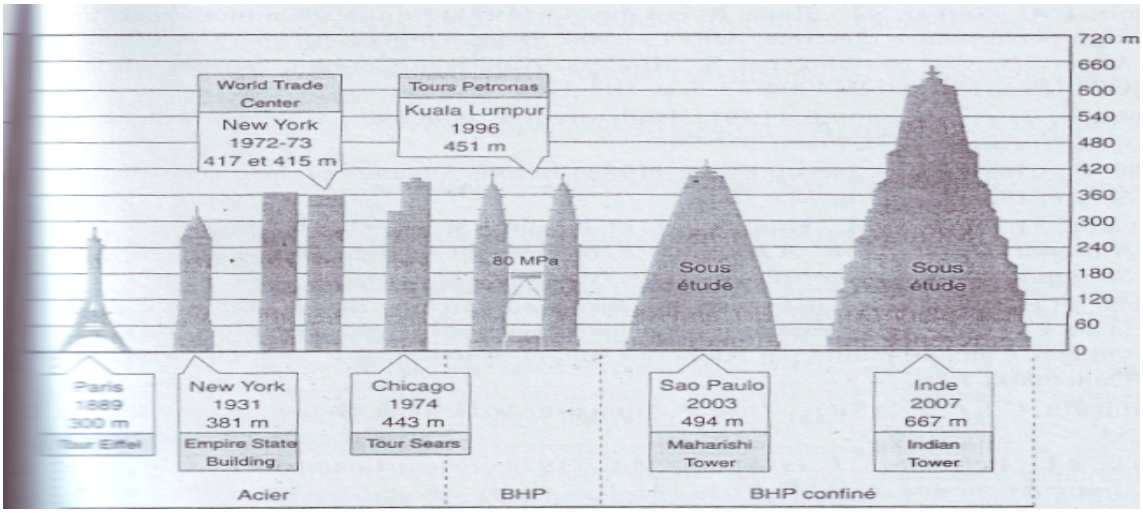


Figure I.4 : Progression de la hauteur des gratte-ciel.

Bien sûr, les bétons à haute performance ne sont pas un remède universel qui ralenti le développement de tous les autres types de bétons. Le béton à haute performance a ses limites, mais c'est un béton durable qui permettra aux concepteurs et aux architectes de dépasser les limites du béton actuel. Parallèlement à ces développements dans le domaine des BHP, nous avons pu voir récemment d'autres bétons de pointe se tailler des marchés de riche tels le béton renforcé de fibres, le béton auto plaçant, le béton coulé sous l'eau, le béton à haute performance compacté au rouleau et le béton de poudres réactives.

Tous ces bétons sont conçus pour des marchés qui sont restreints mais rentables, où la compétition est limitée. Il est évident que cette courte liste de bétons spéciaux n'est pas complète et qu'elle s'allongera très rapidement avec le temps car il sera de plus en plus intéressant d'offrir aux propriétaires et aux entrepreneurs des solutions plus élégantes, plus économiques, plus durables et finalement plus rentables que celles où l'on utilise un béton de 20 à 30MPa**.**

(2) : C'est une démarche assez novatrice lancée par l'administration (Equipement et Recherche) avec le sentier de la fédération nationale des Travaux Publics.

Chose intéressante, on découvre parfois que ces bétons intelligents pourraient fournir des avantages additionnels que ceux pour lesquels ils ont été initialement conçus. Par exemple, l'on peut citer le cas du béton autoplaçant qui a été développé au Japon afin de faciliter la mise en place du béton dans des éléments structuraux congestionnés et qui maintenant commence à être utilisé comme « béton silencieux » ou béton « sans bruit » **[02].**

L'aperçu historique rappelé ci-dessus a mis en évidence l'intérêt de perfectionner le béton qui s'est caréctérisé par l'appelation BHP.

Dans ce contexte, nous rapplons de la paragraphe suivant les prinsipale caractéristiques des BHP.

I.3 Les voies d'obtention des hautes performances

Les études ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité des éxces d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité et la mise en oeuvre. Il était donc nécessaire de chercher à réduire raisonnablement ce dosage en eau en introduisant des fluidifiants. En parallèle les chercheurs voulaient du béton une roche massive et compacte en incorporant des ultratines .

Ainsi deux voies se constituèrent pour obtenir les hautes performances **[04]** :

A- Défloculation des grains de ciment

Obtenue grâce à l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélanine sulfonate). Elle permet aux grains en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle donc à une réduction sensible de l'eau qui n'est plus bloquée dans les flots de grains.

B- Extension du spectre du mélangee granulaire:

Obtenue en introduisant des éléments ultrafins (fumée de silice ; fillers calcaires ; pouzzolane ; laitier) chimiquement réactifs, qui remplissent les vides pour augmenter la compacité et la rhéologie du béton.

Du point de vue applicabilité avec des matériaux locaux, on peut obtenir des bétons ayant une résistance atteignant à la compression entre 60 et 8O MPa. Avec d'autres approches plus strictes et avec un bon choix de matériaux (ciments et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères,...)„ on peut atteindre des performances dépassant 90 MPa**.**

I.3.1 Principes des BHP

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails.

En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné. Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel. Les raisons en sont simple : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le paramètre fondamentale qui gouverne les propriétés des bétons usuels par l'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté **[02].**

I.3.2 Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté

La pâte de ciment hydraté (**C-S-H**) peut, en première approximation, être considérée comme un matériau monocristallin. La dépendance de la résistance à la traction d'un matériau monophasique cristallin par rapport à sa porosité s'exprime généralement par la relation exponentielle suivante :

$$S = S_0 e^{-bp} \qquad \text{I.1.}$$

Où :

S : la résistance à la traction du matériau qui a une certaine porosité ;

S_0 et p : la résistance à la traction intrinsèque du matériau lorsque la porosité est nulle ;

b : paramètre qui dépend de la taille et de la forme des pores.

La résistance à la compression d'un matériau fragile est plus grande que sa résistance à la traction parce que, en traction, un matériau se rompt par la propagation rapide d'une simple fissure alors qu'il faut qu'un certain nombre de fissures de traction se réunissent pour causer une rupture en compression.

Il n'y a pas encore eu d'approche spécifique pour dériver la résistance à la compression d'un matériau poreux à partir de la connaissance des caractéristiques de sa microstructure.

$$f'_c = f_c (1-p)^m \qquad \text{I.2.}$$

f'_c : c'est la résistance à la compression du matériau contenant une porosité ;

f_c et p : représente la résistance à la compression intrinsèque d'un matériau donné lorsqu'il a une porosité nulle ; et

m : est un paramètre qui dépend de la nature des liens inter cristallins que l'on trouve dans le solide.

La résistance d'une pâte de ciment hydraté peut être améliorée en considérant de façon plus détaillée les paramètres suivants :

- **Porosité :** un grande nombre de gros pores ou de vides de diamètre supérieur à 50 nm, concentrés en un endroit donné peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau ;
- **La taille des granulats :** en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue ;
- **Hétérogénéité :** avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance.

I.3.2.1 Porosité

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contacte avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminué, si bien l'hydratation des portions non encore hydratées des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

Comme les premiers produits d'hydratation cristallisent à l'extérieur dans l'espace remplis d'eau qui entoure les graines de ciment (c'est-à-dire à l'extérieur des limites d'une particule de ciment qui s'hydrate), on les appelle des produits d'hydratation externe (Figure I.5). Par contre, lorsque les produits de l'hydratation se forment par des réactions à l'intérieur des limites des particules de ciment, on les appelle des produits d'hydratation interne, ils sont plus compacte et mois bien cristallisés que les produits d'hydratation externes (figure I.6).

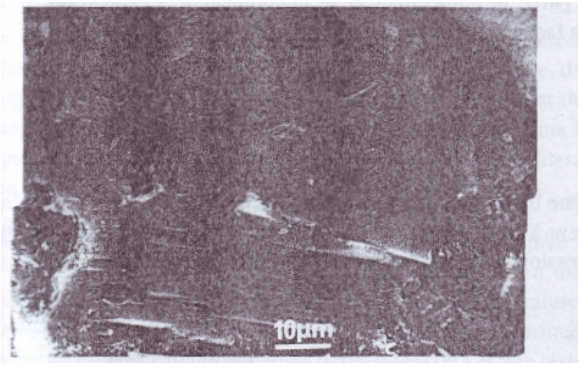


Figure I.5-Produits d'hydradation externes **[02]**.

Figure I.6- Produits d'hydratation internes**. [02]**

Du points de vue de la résistance, il est donc très important d'obtenir une microstructure qui rassemble des produits internes plutôt qu'à celle des produits externes. Comme on le verra plus tard, le concept de produits d'hydratation interne et externe d'un ciment est utile pour apprécier le rôle des faibles rapports eau/ciment, des superplastifiants et des matériaux cimentaires que l'on utilise pour frbriquer des BHP**.**

Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégé durant le malaxage. En 1982, Féret a exprimé sous forme d'un loi :

$$f'c = k\left(\frac{c}{c+a+e}\right)^2 \qquad \text{I.3.}$$

Où :

f'$_c$: représente la résistance à la compression de la pâte de ciment hydraté ;

c, e, a :les volumes du ciment, de l'eau et d'air respectivement ; et

K : est une constante qui dépend du type de ciment (Féret, 1892).

En divisant par c le numérateur et le dénominateur, l'expres$f'c = k\left(\frac{1}{1++\frac{e}{c}}\right)^2$ sion de Féret

peut etre réécrite de la façon suivante :

$$f'c = k\left(\frac{1}{1+\frac{a}{c}+\frac{e}{c}}\right)^2 \qquad \text{I.4.}$$

le volume d'air piégé est généralement inférieur à 1 ou 2 % du volume total du béton ; on peut donc négleger le terme a/c dans l'expression précédente :

$$f'c = k\left(\frac{1}{1++\frac{e}{c}}\right)^2 \qquad \text{I.5.}$$

Si l'on désire augmenter la résistance à la compression d'un béton, il devient évident il qu'il faut absolument réduire le rapport eau/ciment. Quand le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est réduit, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans mélange fraîchement malaxé (Figure I.7). Les particules de ciment étant maintenant plus rapprochées les unes des autres, les produits d'hydratation externes ont mois d'espace à remplir pour relier les différentes particules de ciment et développer une certaine résistance initiale.

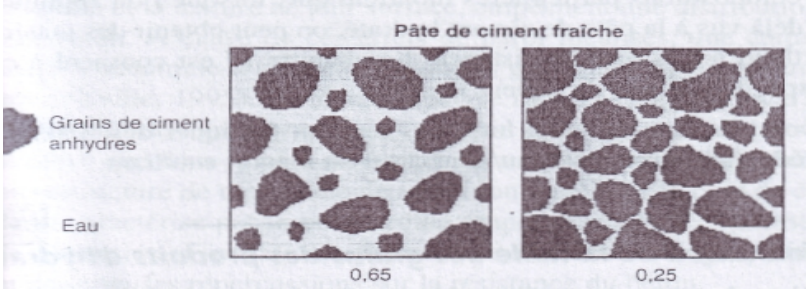


Figure I.7- representationon schématique de deux pates de ciment fraiches de rapports respectifs de 0,65 et 0,25. Dans cette représentation schématique, le rapport de le surface d'eau et de celle des grains de ciment est égal au rapport massique eau/ciment.

I.3.2. 2 Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation

La diminution du rapport eau/liant favorise la formation de produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine, les C-S-H dans ces produits d'hydratation internes ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe.

I.3.3 Composition des bétons à hautes performances

Pour un béton ordinaire, le problème de la composition consiste à réaliser un mélange le plus compact possible ayant une maniabilité acceptable et un coût inférieur, ce qui conduit en générale à limiter le dosage en ciment, composant le plus cher. Pour les BHP, investissement n'est pas vraiment le même. L'objectif est de confectionner un béton avec une résistance à la compression supérieur accompagné d'une amélioration remarquable dans le comportement du béton, aussi bien à l'état frais, qu'à long terme. Alors le dosage en ultrafine qui implique un dosage de superplastifiants représente un facteur très important.

On utilise généralement des ciments Portland de bonne qualité, mais non forcément de haute résistance pour la confection des BHP. La finesse n'a pas besoin d'être très grande étant donné que la granulométrie sera de toute façon complétée par celle de l'ultrafine. Le dosage en ciment varie entre 350 et 550 kg/m^3, suivant la résistance recherchée. De même le dosage en fumée de silice varie de 5 à 15%, par rapport au ciment selon les disponibilités locales.

Pour les superplastifiants, on utilise un dosage entre 1 et 3 % par rapport à la masse de ciment. On est conduit à les mettre en œuvres en deux fois, une première dose dans l'eau de gâchage afin d'assurer le rôle de séparation des grains, et une deuxième dose après l'ensemble des constituants, pour permettre la fluidification du mélange.

Les BHP sont divisés en cinq grande catégories correspondant chacune à une plage de résistance de 25MPa. La *classe I* représente les BHP qui ont une résistance comprise entre 50 et 75MPa, la *classe II*, une résistance comprise entre 75 et 100MPa, la *classe III*, une résistance comprise entre 100 et 125MPa, la *classe IV*, une résistance comprise entre 125 et 150 MPa et la classe V**,** une résistance supérieure à 150MPa (tableau I.1). Les deux dernières classes correspondent en France aux bétons à très hautes performances**.**

TableauI.1- Les différentes classes de BHP **[02].**

Résistance à la compression	***50***	***75***	***100***	***125***	***150***
Classe des BHP	*Classe I*	*Classe II*	*Classe III*	*Classe V I*	*Classe V*

I.3.4 Choix des matériaux pour les BHP

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP, certains choix sont plus critiques que d'autres. Ainsi on commencera à considérer la sélection du ciment Portland même dans le cas ou d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment Portland. La sélection se poursuit par celle du superplastifiant afin d'optimiser la combinaison ciment/superplastifiant. Quand ces choix cruciaux sont faits, on évalue l'utilisation d'un ou plusieurs ajouts cimentaires. La sélection des granulats viendra par la suite puisque leur qualité devient de plus en plus critique pour augmenter la résistance à la compression du **BHP**. Il n'existe pas une méthode précise pour formuler un BHP. Cette formulation dépend essentiellement de la résistance ainsi des performances visées par le BHP.

I.3.4.1 Sélection du ciment

Le premier choix sur lequel il faut s'attarder lorsqu'on veut fabriquer un BHP est celui du ciment, même lorsque l'on utilisera d'autres ajouts cimentaires parce que la performance du ciment en termes de rhéologie et de résistance devient critique au fur et à mesure qu'augmente la résistance à la compression visée.

En général, il n'est pas trop difficile de fabriquer des BHP de classe I avec la plupart des ciments commerciaux actuels ; certains ciments commerciaux ne peuvent être utilisés pour fabriquer des BHP de classe II et très peu de ciments peuvent être servir à fabriquer des BHP de classe IV ou de classe V. Les différentes marques de ciment commerciales n'offrent pas toutes les mêmes performances. Certains ciments présentent de bonnes performances en termes de résistance finale, mais de très mauvaises performances en termes de comportement rhéologique, car il difficile de maintenir la maniabilité des BHP suffisamment longtemps pour pouvoir les placer de façon économique et satisfaisante **[02].**

Les ciments utilisés dans la construction sont caractérisés par leurs constituants, clinker presque pur (*CAP*), avec laitier (*CLK, CHF*) ou ajouts divers (CPJ)**.** Cependant, quand on cherche à avoir des résistances respectables sans diminuer le coût du liant et sans améliorer sa capacité de résistance aux agressions chimiques **[05]**. C'est pour ça que dans la pratique, et afin d'augmenter la performance des BHP, la sélection des superplastifiant est très importante, puisque l'ont doit choisir la meilleure combinaison ciment/superplastifiant. L'obtention des bonne résistance dépend de la finesse du des particules de clinker. L'augmentation de cette finesse conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneure en fine. Au contact de l'eau, il se forme alors très rapidement plus de C-S-H à la surface des grains de ciments, ce qui nuira au maintient de la rhéologie initiale. Enfin, plus le ciment est très fin, plus les risques de fissuration dus au retrait seront grands. En règle générale, il est recommander à limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1µm **[05]**.

En règle générale, plus le teneur en C_3A est faible, plus le contrôle de la rhéologie est facile. Ainsi, lorsque l'on recherche un ciment facile à utiliser pour fabriquer un BHP, il est bon commencé par choisir un ciment qui contient aussi peu de C_3A. Du point de vue de la résistance, ce ciment n'a pas à être broyé finement et à contenir une quantité de C_3S pour garantir une bonne rhéologie. Les ciments de type II et V sont satisfaisants en termes de C_3A, mais en générale, il ne sont pas broyés assez finement et leur teneur en C_3S est faible, de façon à limiter la quantité de chaleur d'hydratation.

A/ Fabrication et composition chimique du ciment portland

Le principe de la fabrication du ciment portland consiste à chauffer dans un four à haute température un mélange de calcaire et d'argile. La préparation de la matière première constitue une étape très importante de la fabrication du ciment. La partie majeure des réactions de formation des silicates et aluminates se fait entre les phases solides. Donc, les particules de matières premières doivent être très rapprochées (très homogénéisées) et de très petites dimensions (la finesse de mouture < 200µm). Sa composition chimique et le traitement thermique (chauffage et refroidissement) ont aussi une grande influence sur les caractéristiques du produit final. La cuisson de la matière première se fait dans un four rotatif légèrement incliné, à une température allant jusqu'à 1450 ^{O}C. Après la cuisson, le mélange est trempé dans un refroidisseur à air la sortie du four à une température inférieure a 100 ^{O}C et les grandes ainsi obtenus s'appellent le clinker. Le clinker est ensuite finement broyé avec une certaine quantité (environ 5 %) de gypse ajouté pour contrôler la prise du ciment lors de l'hydratation.

Le gypse est parfois remplacé partiellement par l'anhydrite $CaSO_4$ ou l'hemihydrate $CaSO_4. I/2H_2O$. Le produit ainsi obtenu s'appelle le ciment portland.

On distingue quatre phases principales dans le clinker :

- le silicate tricalcique **$3Ca0.SiO_2$** ou **C_3S** (50-70 %) ;
- le silicate bicalcique **$2Ca0.Si0_2$** ou **C_2S** (7-20 %) ;
- l'aluminate tricalcique **$3CaO.Al_2O_3$** ou **C_3A** (0- 15 %) ;
- l'aluminoferrite tétracalcique **$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$** ou **C_4AF** (4-20 %).

Le silicate tricalcique et le silicate bicalcique du ciment portland contiennent toujours des impuretés. À cause de ces impuretés on les appelle l'alite et la belite [**06**].

B/Equations de BOGUE [20]

C3S = 4, 07 C* - 7, 60 S* - 6,72A -1,4F;

C2S = 8.60 S* +1,08F+ 5,07A - 3.07 C***;**

C3A = 2.65A -1,69F**;**

C4AF = 3.04F**.**

Avec

A: Al203;

C*: Ca0 (total) – CaO (libre) - 1.27 CO2 - O, 7 SO3;

F : Fe2O3**;**

S* :SiO2 (total) - Si02 (non combinée)

Elles permettent de calculer les proportions théoriques des phases du clinker à partir de la composition en oxyde sur la base des compositions suivantes :
C3S ; C2S ; C3A; C4AF.

C/ L'hydratation du ciment Portland

Lorsque les constituants du ciment sont mis en contact avec l'eau, il se produit une dissolution des particules anhydres pour former de nouveaux composés appelés hydrates. Cette réaction porte le nom d'hydratation et contrôle la prise et le développement de la structure interne de la pâte de ciment. En présence d'eau, les quatre composés identifiés au (tableau 1.2) s'hydratent pour former de nouveaux produits qui vont constituer la structure de la pâte de ciment durcie dans le béton. Les silicates de calcium, C3S et C2S**,** s'hydratent pour former I'hydroxyde de calcium et les silicates de calcium hydratés, aussi appelés gels de tobermorite ou C-S-H.
Le Produits de l'hydratation ciment contient, en masse, environ 25% d'hydroxyde de calcium et 50% de silicates de calcium hydratés. La résistance et les autres propriétés du ciment hydraté sont attribuées aux C-S-H qui sont des particules extrêmement petites, amorphes et dont la structure est fonction du degré d'avancement de l'hydratation.

Toutefois, certains aspects de la durabilité des bétons sont intimement liés à la présence de la Portlandite.

Tableau I.2- Formule chimique et abréviation des quatre principaux constituants du ciment **[07]**.

Constituant	***Formule chimique***	***Abréviation***
Silicate tricalcique	3Ca0.Si02	**C3S**
Silicate bicalcique	2CaO.SiO2	**C2S**
Aluminate tricalcique	3Ca0.A1203	**C3A**
Aluminofemte tétracalcique	$4Ca0.Al_2O_3.Fe2O3$	**C_4AF**

Par ailleurs, le *C3A* réagit avec l'eau et l'hydroxyde de calcium (*Ca (OH) $_2$*) pour former l'aluminate tétracalcique hydraté, et contrôle les propriétés du béton à l'état frais. Le *C3A* peut aussi réagir avec le gypse et l'eau pour donner du sulfoaluminate de calcium hydraté peu soluble. Lorsque le gypse a réagi complètement, l'ettringite se combine avec le *C3A* encore disponible pour former des monosulfoaluminates (*C3A.CaS0a.12H20*). Le *C3A* encore disponible après l'épuisement de la quantité de gypse peut également s'hydrater pour

donner des aluminates hydratés. Le *C4AF* agit avec l'eau pour former l'aluminoferrite de calcium hydraté **[08].**

Du point de vue de résistance, il est important que le ciment portland développe des **C-S-H** aussi dense que possible, parce que les silicates de calcium (qui représentent 80% de la masse de totale du ciment) sont responsables du développement de la résistance dans les bétons. On peut atteindre un tel objectif en diminuant le rapport eau/liant, mais, en même temps, cette diminution du rapport eau/liant entraîne une diminution de la quantité d'eau disponible pour hydrater le ciment Portland. [**02**].

En outre, en continuant à se baser sur les travaux de Powers, Jensen et Hansen ont démontré qu'en présence d'une source extérieure d'eau durant toute l'hydratation du ciment Portland il est possible d'obtenir une pâte de ciment hydratée ne présentant aucune porosité à condition que son rapport E/C soit inférieur à 0,36.

Enfin, l'air entraîné améliore tellement la facilité de mise en place et la finissabilité des bétons à haute performance que la plupart des BHP coulés au Québec contiennent une certaine quantité d'air entraîné, même s'ils ne sont pas exposés à des cycles de gel et dégel [**41**].

D/ L'eau dans la pâte de ciment

L'eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. Les différentes classes sont dans l'ordre croissant de liaison:

- L'eau libre : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure à *10µm* ;
- L'eau adsorbée: elle est adsorbé sur les surfaces solides [**09].**

L'eau est un ingrédient essentiel du béton qui remplit deux fonctions de base :

- Une fonction physique qui donne au béton les propriétés rhéologiques nécessaires ;
- Une fonction chimique qui permet le développement de la réaction d'hydratation.

I.3.4.2 Sélection du superplastifiant

A/ Définition

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (*20000- 30000*). Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement :

- ✓ les solubilités ;

- ✓ les vitesses de dissolution ;
- ✓ l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique.

B/ Modes d'action

Leur action est différente d'un adjuvant à un autre en contact des grains de ciment.

D'une manière générale, les adjuvants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. Nous détaillerons plus bas, certaines réactions des différents adjuvants avec le ciment.

C/ fonctions

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une fonction secondaire :

Tableau I.3- Les fonctions principale et secondaire d'un adjuvant.

1- Fonction Principale	***2- Fonctions secondaires***
Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Elle est caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci. *Cette fonction peut varier selon le dosage de l'adjuvant et les matériaux utilisés.*	*En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires* *(ex: plastifiant retardataire, retardataire-plastifiant. réducteur d'eau).*

Un adjuvant n'est pas provisoirement. Il n'a ni pour effet ni pour mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage, d'une mauvaise composition ou d'une mise en oeuvre défectueuse. **«***Ce n'est pas un produit miracle***».** Bien au contraire il peut avoir des effets secondaires néfastes au béton [**10]**.

La sélection d'un superplastifiant efficace est aussi cruciale que celle d'un ciment quand on veut fabriquer des BHP parce que tous les types et toutes les marques se superplastifiant ne réagissent pas de la même façon avec tous les ciments. L'expérience démontre que tous les superplastifiant commerciaux n'ont pas la même efficacité pour disperser les particules de ciment à l'intérieur d'un béton en réduisant la quantité d'eau de gâchage et en contrôle la rhéologie de béton de très faible rapport eau/liant durant la première heure qui suit le contacte entre le ciment et l'eau.

Dans ce qui suit, on présente la meilleure façon de choisir un type de superplastifiant de marque donnée et sa méthode d'introduction dans le béton. Les superplastifiants commerciaux peuvent être classés de façon simplifiée en cinq grandes catégories selon la nature chimique de leur base :

- Les poly condensés de formaléhyde et de mélamine sulfonate, aussi appelés mélamine sulfonate ;
- Les poly condensés de formaléhyde et de naphtalène sulfonate, aussi appelés naphtalène sulfonate ;
- Les superplastifiants à base de lignosulfonate ;
- Les polyacrylates (ce type de superplastifiant est faible, mais cela ne veut pas dire que ce type de superplastifiant n'est pas promis à un bel avenir dans le domaine des BHP) ;
- Les produits à base d'acide carboxylique.

Il faut mentionner que, très souvent, les formulations commerciales des superplastifiants contiennent d'autres molécules qui sont rajoutées de façon à améliorer l'efficacité du superplastifiant dans des conditions particulières. Par exemple, certaines poly naphtalènes peuvent contenir une certaine quantité de lignosulfonate [**02**].

I.3.4.2.1 Super plastifiants à base de mélamine :

À l'heure actuelle cependant, les superplastifiants à base de mélamine peuvent être fabriqués par n'importe quel manufacturier. Ainsi, peuvent être produits sous différentes marques commerciales et leur performance sera sûrement beaucoup mois uniforme.

Les superplastifiants à base mélamine ont été utilisés en Europe comme en Amérique de Nord lorsque les bétons à haute résistance ont été développés dans les années 1970 et au début des années 1980. Quand on demande aux utilisateurs de poly mélamine les raisons de leur préférence pour ce type de superplastifiant, ils invoquent en général une grande variété de réponses :

- Les superplastifiants à base de mélamine ne retardent pas la prise du béton autant que les superplastifiants à base de naphtalène ;
- Puisque leur teneur en solide (dans la formulation à 22%) correspond à la moitié de celle d'un polynaphtalène, tout dosage accidentel est mois critique que dans le cas d'un polynaphtalène ;

- Les superplastifiant à base mélamine ont une qualité et une performance très constante (ceci sera peut être mois vari dans le futur) ;
- Les superplastifiants à base de mélamine ne donnent pas une teinte légèrement beige aux BHP architecturaux qui sont fabriqués avec un ciment blanc ;
- Les superplastifiants à base mélamine piègent beaucoup mois de bulle d'air à la surface des éléments préfabriqués ;
- La qualité du service et la fiabilité du produit sont meilleurs que dans le cas des poly naphtalènes ;

Les Superplastifiants à base mélamine sont en général vendus sous forme de sel de sodium liquide ou en poudre.

I.3.4.2 .2 Super plastifiants à base de naphtalène :

Les superplastifiants à base naphtalène ont été brevetés en 1938, mais ils n'ont utilisés dans l'industrie que vers des années 1960. Les superplastifiants à base naphtalène sont vendus sous forme d'un liquide brun qui a une teneur totale en solides généralement comprise entre 40 et 42%.

Quand on demande aux gens qui utilisant des poly naphtalènes pourquoi ils utilisent ce type de superplastifiant plutôt qu'une mélamine ?

- Les poly naphtalènes ont une teneur en solide plus élevée si bien que leur emploi est plus économique pour obtenir un certain degré de maniabilité ;
- Il est plus facile de contrôle la rhéologie d'un BHP à cause du léger retard de prise et de durcissement qu'ils entraînent ;
- Le coût des poly naphtalènes peut être négocié avec plusieurs fournisseurs ;
- La encore, certains producteurs de BHP avouent candidement qu'ils ont commencé à utiliser des polynaphtalène, qu'ils ont eu de bons résultats et qu'ils ont continué à le faire sans chercher à changer de type de superplastifiant.

D'autres sels de polynaphtalène ont été étudiés par des chercheurs, mais, jusqu'à présent, ils n'ont pas été utilisés pour fabriquer des BHP**.**

I.3.4.2 .3 Super plastifiants à base de lignosulfonate

Les superplastifiants à base de lignosulfonate sont rarement utilisés de façon individuelle dans les BHP**,** mais plutôt en combinaison avec des mélamines ou des poly naphtalènes. Quelques producteurs de béton préfèrent introduire d'abord un superplastifiant à

base de lignosulfonate au début du malaxage pour ensuite un polymélamine ou un polynaphtalène plus pure à la fin du malaxage ou lorsque l'affaissement du BHP doit être ajuster en le chantier.

I.3.4.3 La définition des types des superplastifiants et relation avec leur fonction dans le béton

Le tableau ci-dessous (Tableau I.4) présente les différents types de super plastifiant et leur fonction et effets principaux :

Tableau I.4- Les caractéristiques des adjuvants en relation avec leur fonction**.**

Adjuvant	***Norme***	***Effets principaux***
Adjuvant plastifiant réducteur d'eau	**NF P 18-336**	*À consistance égale, il permet une réduction du dosage en eau et, à dosage en eau constant, il permet une augmentation de l'affaissement au cône d'abrams.*
Adjuvant super plastifiant –haut réducteur d'eau	**P 18 - 330**	*Sa définition est identique à celle du plastifiant –réducteur d'eau mais la réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement au cône est plus marquée*
Adjuvant entraîneur d'air	**NF P 18-338**	*Il permet la formation, au moment du malaxage, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air qui subsiste dans le béton durci.*
Adjuvant accélérateur de prise	**NF P 18-331**	*Il avance le début de prise, c'est-à-dire le moment où le béton frais passe de l'état plastique (moulable) à l'état rigide. La mesure du temps de prise se fait sur mortier normale* ***(pr. NF P 15-431).***
Adjuvant accélérateur de durcissement	**NF P 18-332**	*Il accélère le développement de la résistance du béton à court terme. Les*

		*adjuvants chlorés et non chlorés s'applique également aux accélérateurs de durcissement (**norme NF P 18-332**, adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Accélérateurs de durcissement sans chlorés).*
Adjuvant retardateur de prise	**NF P337**	*Il retarde le début de prise et prolonge l'état plastique où le béton est moulable.*
Adjuvants hydrophobant	**EN 480-5**	*Il réduit l'absorption capillaire du béton durci. L'absorption capillaire est mesurée suivant le projet de norme européenne **pr. EN 480-5**.*

I.3.4.4 Sélectin du liant pour les BHP

Jusqu'à présent, l'expérience a montré que BHP de classe I et II (50 à 100MPa) peuvent être fabriqués en utilisant une grande variété de liants, on a peut utiliser du :

- Ciment Portland seul ;
- Ciment Portland et de la fumée de silice ;
- Ciment Portland, du laitier et de la fumée de silice ;
- Ciment Portland, des cendres volantes et de la fumée de silice ;
- Ciment Portland et de la laitier à haut fourneau ;
- Ciment Portland et des cendres volantes.

La documentation montre aussi que la plupart des BHP de classe III (100 à 125MPa) qui a été produits jusqu'à ce jour contenait de la fumée de silice, sauf dans quelques cas rares où l'on visé une résistance de 100MPa en utilisant du ciment Portland pur.

Jusqu'à présent, les BHP de *classe IV et V* qui ont été fabriqués contenaient tous de la fumée de silice. En outre que, au fur et à mesure que la résistance à la compression des BHP augmente, on peut utiliser de mois en mois de combinaisons cimentaires. Ces ajouts cimentaires coûtent mois cher que le ciment Portland et leur utilisation permet de réduire

quelque peu le dosage de superplastifiant. Leur utilisation entraîne donc, non seulement des économies, mais aussi un contrôle plus facile de la rhéologie de tels bétons.

Jusqu'à aujourd'hui, sont rare les cas où l'on décidé d'utiliser des ajouts cimentaires pour des questions rhéologiques, mais ce type d'utilisation va sûrement se développer dans le future. Même si l'on se réfère toujours à des considérations économiques pour justifier l'incorporation d'ajoutes cimentaires, on souligne rarement les économies qu'elle entraîne au niveau de la réduction du dosage de superplastifiant pour obtenir une maniabilité désirée.

I.3.4.5Composition de quelques bétons rencontrés dans la littérature

Même s'il n'existe pas de règle bien établie sur la composition d'un béton à hautes performances, il est utile d'un présenter quelques types qui ont donnés satisfaction. Plusieurs de ces compositions comportent, en plus du ciment Portland et de la fumée de silice, d'autres ajouts minéraux. L'utilisation de ces divers composants présente un avantage économique, d'abord parce qu'ils sont moins coûteux, mais aussi parce qu'ils permettent de réduire le dosage en superplastifiant **[07] [05**].

I.3.4.5.1 BHP confectionné par Haque (1998)

Les performances offertes par la fumée de silice sont justifiées par sa plus grande surface spécifique (15 m²/g) et la très faible dimension de ces grains (*inférieur à 1μm*). Cependant le coût y est plus élevé. Ils ont pensé qu'on obtiendrait des bonnes performances et à faible coût avec des cendres volantes encore beaucoup plus fines que d'habitude. Les résultats d'essais de compression sur des formulations obtenues sont consignés dans le tableau I.5.

Tableau 1.5- Résistance en compression des BHP aux cendres volantes (sur des cubes de *200mm* de coté)

Matériaux	***Dosage***					
Ciment (Kg/m^3)	*400*	*360*	*340*	*500*	***450***	*425*
Cendres volantes (Kg/m^3)	*0*	*40*	*60*	*0*	***50***	*75*
Eau (Litres)	*146.4*	*137.2*	*150.9*	*178.4*	***115.3***	*133.6*
Super plastifiant (Litre)	*6.0*	*6.0*	*6.0*	*7.5*	***7.5***	*7.5*
Gravier10 mm de granite concassé (kg/m^3)	*1113.4*	*1084.1*	*1069.4*	*1011.8*	***976.1***	*957.7*
Sable (kg/m^3)	*761.1*	*741.2*	*730.9*	*691.6*	***666.9***	*655.0*
F_c (MPa) 7j	*62.0*	*70.0*	*58.0*	*69.0*	***84.0***	*75.0*
14j	*70.5*	*77.5*	*65.0*	*75.0*	***93.5***	*89.0*
28j	*77.5*	*94.0*	*73.5*	*92.5*	***111.0***	*102.0*
56j	-	*99.5*	-	*106.0*	***121.5***	*113.5*

I.3.4.5.2 BHP confectionné par Wang (1999)

Le tableauI.6 suivant représente un exemple de formulation d'un BHP de résistance *100MPa à 28 jours.*

Tableau I.6- Formulation d'un BHP de résistance100MPa [**05**].

Composition de BHP	***Dosage (Kg/m^3)***
Ciment Portland	*490*
Cendres volantes	*140*
Micro silice sèche	*70*
Gravier10 mm	*1045*
Sable de rivière fin	*450*
Superplastifiants (Naphtalène)	*20Litre*
Retardateur	*1-2*

Les résistances moyennes à 28 jours sont de 116.3MPa sur des cubes de 100mm et 109.7MPa sur des cubes de 150mm.

I.3.4.5.3 Autres BHP

Dans le tableau I.7 qui suit, on va voir des bétons confectionnés dans plusieurs pays dans le monde et qui ont prouvé leur efficacité. Le béton représente un intérêt particulier: son rapport eau/ciment est de 0.25 et son dosage totale en liant est de 542 kg/m^3 dont 30 % de laitier de haut fourneau et 10 % de fumée de silice. La résistance à la compression était de 114 MPa à 28 jours et atteint 136MPa à 1 an. Ce béton n'a pas été confectionné en laboratoire, mais dans une usine de béton prêt à l'emploi. Il est bon d'ajouter que la production commerciale de béton à hautes performances nécessite un contrôle sévère et régulier de la qualité [**07**].

Tableau I.7- Composition de BHP dans certains pays **[07]**.

Ingrédient (kg/m^3)	Mélange							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Ciment Portland	534	500	315	513	163	228	425	450
Fumée de silice	40	30	36	43	54	46	40	45
Cendres volantes	59	–	–	–	–	–	–	–
Laitier de haut fourneau	–	–	137	–	325	182	–	–
Granulat fin	623	700	745	685	730	800	755	736
Gros granulat	1069	1100	1130	1080	1100	1110	1045	1118
Eau totale	139	143	150	139	136	138	175**	143
Rapport eau/liant* **	0,22	0,27	0,31	0,25	0,25	0,30	0,38	0,29
Affaissement (mm)	255	–	–	–	200	220	230	230
Résistance du cylindre (MPa) à l'âge de (jour) :								
1	–	–	–	–	13	19	–	35
2	–	–	–	65	–	–	–	–
7	–	–	67	91	72	62	–	68
28	–	93	83	119	114	105	95	111
56	124	–	–	–	–	–	–	–
91	–	107	93	145	126	121	105	–
365	–	–	–	–	136	126	–	–

* Information supplémentaire à ce suiet : (A) États-Unis ; (B) Canada ; (C) Canada ; (D
Unis ; (E) Canada ; (F) Canada ; (G) Maroc ; (H) France
** L'auteur pense que le dosage en eau élevé est dû à la température ambiante élevée au Maroc.
*** Par liant, on doit entendre la totalité des composants hydrauliques (Portland + un ou plusieurs compo

Les paramètres de composition pour la confection des bétons utilisant les deux ciments sont présentés dans le (tableau I.8). Le pourcentage de fumée de silice introduit dans les mélanges est respectivement de 0, 10, 20 et 30% en poids de liant. L'ajout de fumée de silice est réalisé par substitution d'une partie du ciment par le même poids de fumée, et 4 dosages en liant (ciment + fumée de silice) ont été retenus : 310, 400, 460 et 550 kg/m3.

Tous les bétons étudiés sont des bétons à hautes performances fluidifiés à la dose de saturation. La dose de saturation a été déterminée par la méthode des coulis. Les affaissements obtenus au cône d'Abrams ont varié entre 17 et 20cm. L'eau totale introduite dans les mélanges, y compris l'eau contenue dans les Super plastifiants, est égale à 141 1/m3, et les rapports eau/liant étudiés sont respectivement de 0,25, 0,30, 0,35 et 0,45.

TableauI.8- Compositions et propriétés du béton frais [**11**].

N° Mélange		*G/(C+FS)*	*FS/(C+FS) (%)*	*Dosage des composants (kglm3)*			*SP (%)*	*Propriétés du béton frais*		
				Ciment	*FS*	*Granulats*		*Ait. (cm)*	*Densité kg/m3*	*Air (%)*
C1	*1*	*0,25*	*0*	*550*	*0*	*1830*	*5,5*	*16*	*2,55*	*1.2*
	2		*10*	*495*	*55*	*1840*	*2,8*	*17*	*2,54*	*1,5*
	3		*20*	*440*	*110*	*1810*	*3 4*	*16*	*2,52*	*1,3*
	4		*30*	*385*	*165*	*1782*	*4*	*17*	*2,49*	*1,1*
	5	*0,30*	*0*	*460*	*0*	*1896*	*2,6*	*18*	*2,51*	*1,6*
	6		*10*	*414*	*46*	*1888*	*1,6*	*19*	*2,49*	*1,7*
	7		*20*	*368*	*92*	*1862*	*2 4*	*17*	*2,47*	*1,2*
	8		*30*	*322*	*138*	*1840*	*2,8*	*17*	*2,45*	*0,9*
	9	*0,35*	*0*	*400*	*0*	*1940*	*4*	*16*	*2,49*	*1,5*
	10		*10*	*360*	*40*	*1929*	*1*	*17*	*2,48*	*1,4*
	11		*20*	*320*	*80*	*1906*	*1,6*	*17*	*2,46*	*1,1*
	12		*30*	*290*	*120*	*1885*	*2*	*17*	*2,44*	*1,6*
	13	*0,45*	*0*	*310*	*0*	*1912*	*06*	*17*	*2,37*	*1,4*
	14		*10*	*279*	*31*	*1901*	*0 4*	*18*	*2,35*	*1,3*
	15		*20*	*248*	*62*	*1885*	*0,8*	*17*	*2,34*	*1,4*
	16		*30*	*217*	*93*	*1869*	*1*	*17*	*2,33*	*0.9*
C2	*17*	*0,30*	*0*	*460*	*0*	*1897*	*1,8*	*19*	*2,51*	*1,3*
	18		*10*	*414*	*46*	*1889*	*0,8*	*19*	*2,49*	*1,5*
	19		*20*	*368*	*92*	*1867*	*1,2*	*17*	*2,47*	*1.4*
	20		*30*	*32.2*	*138*	*1840*	*2*	*18*	*2,45*	*1.1*
	21	*0,35*	*0*	*400*	*0*	*1942*	*0,6*	*20*	*2,48*	*0,9*
	22		*10*	*360*	*40*	*1928*	*0,4*	*21*	*2,47*	*1,5*
	23		*20*	*320*	*80*	*1909*	*0,8*	*20*	*2,45*	*1,4*
	24		*30*	*280*	*120*	*1891*	*1*	*19*	*2,43*	*0.8*

I.3.4.5.4 Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des BHP

Le pourcentages de ajout cimentaire est de fixé à 10% en poids du ciment et le rapport E/L=0.30. La formulation de ces bétons a été faite sur la base de la méthode **DREUX-GORISSE.**

Pour réaliser cette étude des éprouvettes cylindriques de dimentions 16x32 cm2.

Tableau I.9- Composition des bétons étudiés **[12].**

Type de béton	G/S	E/C	Granulat (L)	Ciment (Kg)	Ajout (Kg)	Eau (L)	Superplastifiant	Densité moyenne
B-PZ	2.50	0.30	525	480	50	150	8.20	1.885
B-FS	2.50	0.30	525	480	50	150	8.20	2.426
B-LT	2.50	0.30	525	480	50	150	8.20	2.450
B-SC	2.50	0.30	525	480	50	150	8.20	2.145
B-TM	2.50	0.30	525	500	0	150	0	2.420

Tableau I.10-Varaition de la masse volumique en fonction du temps **[12]**.

Type de béton	Ambiance de conservation	Age en jour			
		1	3	7	28
B-PZ	air	2235	2210	2193	2174
B-FS	air	2426	2396	2368	2359
B-LT	air	2450	2407	2393	2361
B-SC	air	2145	2112	2097	2063
B-TM	air	2420	2399	2382	2365

Tableau I.11- évaluation de la résistance à la compression **[12]**.

Type de béton	Age en jour		
	3	7	28
B-PZ	41.83	46.74	50.11
B-FS	-	-	63.20
B-LT	33.27	36.89	42.29
B-SC	38.52	46.52	52.23
B-TM	21.71	26.34	35.09

I.3.4.5.5 Les additions normalisées pour Les BHP

Les ajouts minéraux sont des produits ultrafins composés de particules de trés faibles dimentions qui, ajoutés au ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques [**13].**

De leur côté, les normes "Additions" prennent en compte cet aspect en introduisant un concept d'activité, quantifié par une méthode appropriée et appelé, par exemple, "indice d'activité" (le nom peut varier selon les normes). Ce concept n'est pas nécessairement applicable à toutes les additions, pour une addition donnée, à tous les types ou toutes les

catégories que la norme peut distinguer. Particulélement en France, la distinction entre les additions qui sont ou qui ne sont pas substituables ne recoupe pas nécessairement la distinction proposée par la norme **ENV 206** entre :

- **Type I** (additions quasimenet inertes) ,
- **Type II** (pouzzolanes et additions à caractère hydraulique latent) [**13**].

A/ Les ajouts inertes :

Sont des produits qui n'ont aucune influence sur le processus de fabrication d'hydratation et de durcissement du ciment, ces ajouts finement broyés sont ajoutés au clinker avant le broyage.

B/ Les ajouts actifs :

On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles finement broyées et ajoutées au clinker avant ou après le broyage, améliorent la résistance du ciment et son pouvoir hydraulique [**42**].

I.3.4.5.5.1 Fumée de silice NF P 18-502

La fumée de silice est une nouvelle venue parmi les liants hydrauliques. À l'origine, elle a été présentée comme une pouzzolane. Cependant, son action dans le béton n'est pas seulement celle d'une pouzzolane très réactive. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, mais le terme «fumée de silice » est le plus généralement utilisé. Les très petites particules de fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides[**07**].

L’adjonction de fumée de silice ne se traduit par une augmentation de la résistance que pour des valeurs de FS/C inférieur à 26%**.** En effet, pour s’hydrater, la fumée de silice a besoin de la chaux dégagée par le clinker au cours de son hydratation ; plus il y a de fumée de silice et moins il y a de clinker donc moins de chaux. Si l’on mélange la fumée de silice avec un ciment qui n’est pas du CPA, mais un CPJ faiblement dosé en clinker, l’effet pouzzolaniques s’en ressentira car le dégagement de chaux sera plus faible.

Pratiquement, l’utilisation des fumées de silice dans le but d’obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 18% ; même si l’effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l’ordre de 33%**.** Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d’être moindres voir même des difficultés de mise en oeuvre. Propose un dosage optimal compris entre 6 et 10% **[02].**

Il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice. Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de calcium Ca^{+2}, libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton [**15**].

I.3.4.5.5.2 Pouzzolanes ASTM 618-94

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires [**16**]. Est un matériau d'origine naturelle ou artificielle contenant de la silice sous forme réactive. Une définition plus explicite est donnée par la norme *d'ASTM 618-94* a qui décrit une pouzzolane comme un matériau siliceux ou silico-alumineux qui, intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, mais qui, finement broyée en présence d'humidité et à des températures ordinaires, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés hydrauliques.

Le principal matériau pouzzolanique artificiel, les cendres volantes, sera examiné plus loin. La norme *ASTM C 618-94a* décrit ces matériaux comme appartenant à la *classe N* [**07**] .

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers

- Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques,
- en renforcement l'imperméabilité et de la durabilité du mortier,
- à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait du mortier au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment [**17**].

A/ Matériaux Pouzzolaniques

Matières siliceuses ou alumino-siliceuses naturelles d'origine volcanique ou artificielle. On distingue entre :

- Pouzzolanes naturelles (d'origine volcanique) *désignation abrégée : P*

-Pouzzolanes naturelles calcinées (matériaux traités thermiquement) désignation abrégée: *Q* [**18**].

.

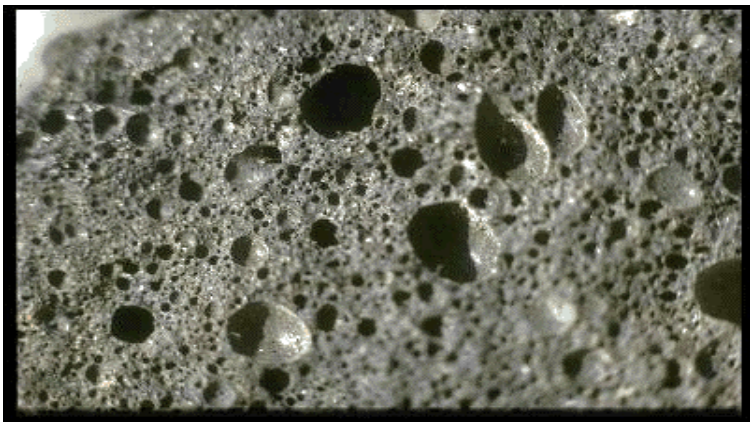


Photo I.1 : type Pouzzolane naturelle.

B/ Pouzzolanes naturelles:

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton [**32**].

C/ Pouzzolane artificielle

Toute matière essentiellement composée de silice et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Egalement à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques [**19**].

D/ Pouzzolanes et pouzzolanicité:

L'étude de la Gravenne de Thueyts offre l'occasion de se pencher sur la pouzzolane en tant que matériau (Photos 1.2 et 1.3). En France le terme pouzzolane concerne soit des scories volcaniques de composition basaltique ou proche, soit des matériaux ayant des propriétés dites «pouzzolaniques» et pouvant avoir des origines très diverses. Ainsi, la définition suivante : «Les pouzzolanes de Pozzuoli (Italie Centrale), sont des cendres trachytiques claires et friables, qui sont susceptibles d'être utilisées comme ciment naturel». La pouzzolane est généralement rouge ou noire.

Photo I.2- pouzzolanes rouges calibrées (Carrière EST).

Photo I.3- Pouzzolane noire (Carrière EST).

Les pouzzolanes sont des matières naturelles ou artificielles qui, ajoutées à du ciment, donnent un produit de qualité supérieure pour un prix généralement très bas de propriétés de prise mais qui, finement divisée et en présence de chaux, réagit avec l'hydroxyde de chaux à la température ordinaire pour former un composé ayant les propriétés d'un ciment» [**20**].

I.3.4.5.5.3 Le laitier à haut fourneau NF P18-506

Le laitier est un sous produit issu de la fabrication de la fonte. Lors de l'élaboration de la fonte dans le haut fourneau, il y a production de composés gazeux (gaz de haut fourneau), liquides (fonte, laitier) et solides (poussière de gaz). Ces éléments proviennent de la gangue des minerais, des cendres de combustibles et des additions siliceuses, calcaires ou magnésiennes des fondants. Les quantités de laitier par tonne de fonte sont donc déterminées par les conditions mêmes d'exploitation, et aussi par la nature du minerai.

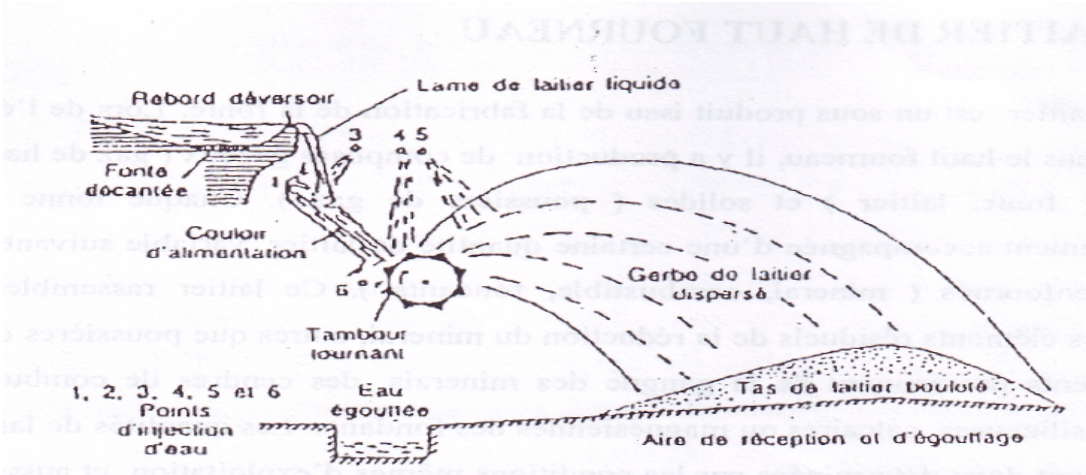


Figure I.8- Schéma de fabrication du laitier bouleté.

La composition du laitier varie dans des proportions sensibles, suivant la marche du haut fourneau et les conditions de son fonctionnement. Par voie de conséquence, les constituants secondaires du laitier ne se trouveront pas aux mêmes concentrations, suivant que

le rapport laitier / fonte sera faible ou élevé. Ceci influera sur les propriétés du laitier.

Le laitier en fusion, liquide se séparant par gravité de la fonte en fusion, est évacué par le trou de coulée. Selon le mode de solidification, on obtient des produits différents: (figure I.8).

• Le laitier cristallisé, obtenu par refroidissement lent à l'air, donne une roche dure, angulaire et frottante qui, après concassage et criblage, est utilisé comme granulat dans le béton, matériaux d'assises de chaussées, enrobés bitumeux, remblais

• Le laitier vitrifié *NF P18-506*, obtenu par refroidissement brutal (trempe):

- par de l'eau sous pression (granulation) donnant le laitier, de glanulométrie 0/5.
- à l'eau et l'air donnant le laitier bouleté, de granulométrie 0/20 environ.

Il résulte un laitier comparable au laitier granulé mais à granulométrie très étalée, ce qui permet son utilisation, d'une part une partie comme laitier granulé et d'autre part une autre comme granulats de laitier expansé. Cette technique de traitement offre notamment l'avantage d'un investissement modéré, de frais d'entretien raisonnables et d'une faibli consommation d'eau (l m^3/t de laitier , soit 8 à 10 fois moins qu'en granulation classique) [**21**].

A/ Laitier vitrifier moulu de haut fourneau NF P 18-506

Le laitier vitrifié moulu est une addition du *type II*. La norme distingue deux classes de laitier *A et B* ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant la plus élevée. Tous les laitiers couverts par la norme sont de *type II* au sens de la norme *ENV 206*, mais seuls les laitiers de classe *B* sont substituables au sens et sous les conditions de la norme *P 18-305*. Depuis que cette norme *NF P 18-506* est publiée (*1992*), aucune utilisation industrielle du laitier comme addition au béton n'a été signalée en France [**13**].

B/ Composition chimique du laitier

La composition chimique du laitier est un facteur qui détermine son emploi. Elle peut varier dans de larges limites suivant la nature du minerai, la nature et la qualité des fondants, du combustible et du procédé employé. Exception faite pour quelques fabrication spéciales, le laitier de haut-fourneau doit 92% de sa composition chimique aux quatre oxydes *CaO - MgO - Si02 et A1203*. La (figure I.9) présente dans le système ternaire *CaO- SiO_2- AL_2O_3* la position du laitier par rapport à d'autres matériaux tels que ciment, pouzzolanes et verres industriels [**22**]. La connaissance de cette composition permet d'expliquer ou de prévoir ses propriétés mécaniques, physiques et chimiques Les principaux constituants du laitier cristallisé sont représentés dans le tableau ci-dessous :

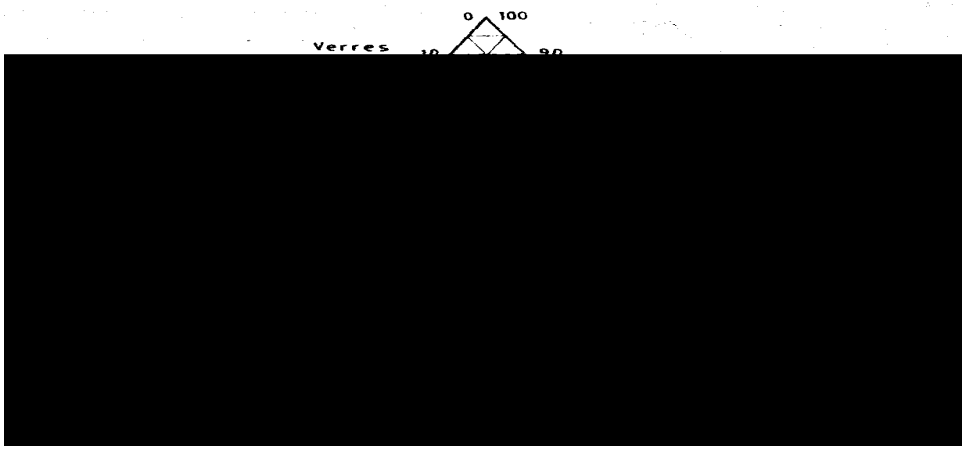


Figure I.9 -Situation dans le système ternaire **CaO- SiO_2- Al_2O_3** du laitier de haut fourneau.

C/ Hydraulicite du Laitier Vitrifie

Contrairement au ciment portland, qui est stable dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcanalisé. Il a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant ou activateur. Lorsque le laitier est simplement mélangé à l'eau, une couche pseudomorphique, peu pénétrable se forme sur la surface du laitier et inhibé de ce fait la pénétration de l'eau au sein du grain et la dissolution des ions. Il est alors nécessaire d'ajouter un activateur pour permettre l'hydratation du grain de laitier [**21**].

I.3.4.5.5.4 Fillers de Calcaire

Un filler est un matériau très finement broyé à une finesse à peu prés identique a celle du ciment Portland, qui, en raison de ses propriétés physiques, a un effet bénéfique sur certaines propriétés du béton, telles que la maniabilité, la masse volumique, la perméabilité, la capillarité, le ressuage ou la tendance à la fissuration.

Les fillers sont en général chimiquement inertes, mais le fait qu'ils présenter; certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantages, le même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation. En effet, Zielinska a trouvé que le *CaCO3,* qui est un filler courant, réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former **v.** Les fillers peuvent améliorer l'hydratation du ciment Portland en agissant comme des sites de nucléation. Les fillers peuvent être des matériaux naturels ou provenant de procédés industriels traitant des minéraux inorganiques. Il est essentiel que leurs propriétés soient constantes, en particulier leur finesse.

Bien que la norme *NF P 15-301 de 199* limite la teneur en filler à 5%, elle permet l'utilisation de filler calcaire jusqu' à 35%, à condition que le matériau hydraulique restant soit

exclusivement du ciment Portland. Ce ciment est dénommé ciment Portland avec filler calcaire *CPJ-CEM II/B (L).* Comme le calcaire est en fait un type de filler. Pour certains usages, les ciments composés contenant 15% de filler, voire 20%, ont de fortes chances d'être utilisés couramment dans le futur [**07**].

A/ L'effet filler :

On explique parfois à tort l'activité d'une addition calcaire par ce que l'on appelle "*l'effet filler*" ; intuitivement, on imagine que les grains fins de la poudre se glissent entre les grains plus gros (ceux du sable), qu'ils augmentent ainsi la compacité et, par conséquent, la résistance. Or, même si les grains fins de l'addition participent à l'optimisation de la courbe granulométrie, cela n'a pas de conséquence sur la valeur de l'indice d'activité tel qu'il est défini. Une caractéristique importante du béton frais est sa porosité **e+v** (somme du dosage en eau nécessaire **e** pour avoir cette consistance et de la teneur en air occlus **v** dans le béton, après mise en place). Si l'on fait varier le dosage en éléments fins du béton (tous les grains inférieurs à 63 micromètres, qu'ils appartiennent au ciment, à l'addition ou aux granulats), on observe l'existence d'un dosage optimal pour lequel la porosité du béton frais est minimale. Pour un béton dont la dimension maximale du plus gros granulat est de 20mm, ce dosage optimal en éléments fins est de l'ordre de 350 kg/m^3.

Il n'y a aucune raison pour que 1'effet filler soit considéré comme une propriété des additions puisque c'est, en fait, une propriété, à consistance constante, de la granulerait optimale des bétons. Cet optimum granulométrique et, tout particulièrement, l'optimum en éléments fins, a bien d'autres effets bénéfiques sur le comportement du béton frais : il limite le ressuage, augmente la cohésion, facilite le démoulage immédiat [**13**].

I.3.4.6 Optimiser les granulats résistants

Les granults utilisés pour fabriquer des BHP peuvent être des sables naturals, des graviers ou des granulats concassés. La résistance des granulats naturels dépend de la nateur de la roche-mère qui a été concasée ou usée à la dimention actuelle après avoir subi différents processus naturals ou mécaniques. Si les granulats concasés sont utilisés pour fabriquer un BHP**,** il faut que leur fabrication conduise à l'obtention des particules individuelles qui contiennent la quantité minimale d'élements faibles. Si l'on veut augmenter la résistance d'un béton, il faut porter une attention particulière à la nature du granult lors de sa sélection.

Les BHP ont surtout un rapport eau/liant plus faible que celui des bétons usuels ; ils contiennent assez souvent des particules ultrafines telles que la fumée de silice pour améliorer la résistance de la pâte de ciment hydraté surtout dans la zone de transition et ils, sont fabriqués avec des granulats résistants. Puisque les particules du liant sont rapprochées les unes des autres, elle peuvent développer des liens très forts durant leur hydratation, mais cette proximité des grains de ciment peut aussi créer les problèmes rhéologiques dans le béton frais.

I.3.4.6.1 Granulat fin

En générale, les granulats fins que l'on utilise pour fabriquer des BHP ont une distribution granulométrique comprise dans les limites recommandées par la norme *ACI* pour les bétons usuels. Cependant, chaque fois que cela est possible, on peut choisir un granulat fin qui se situe sur la partie grossière de ces limites, c'est-à-dire un granulat fin qui a un module de finesse comprise entre *2.7 et 3.0*.

En outre, l'utilisation d'un sable plutôt grossier peut amener une certaine diminution de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir une maniabilité donnée, ce qui est un avantage du point de vue de la résistance et du point de vue économique. L'utilisation d'un sable grossier permet aussi d'obtenir un meilleur cisaillement de la pâte de ciment durant son malaxage. Le remplacement partiel d'un sable naturel par un sable manufacturé peut présenter quelques avantages surtout si le sable manufacturé a été fabriqué en utilisant une roche très résistante.

I.3.4.6.2 La forme, l'état de surface et l'origine

Il faut rappeler que la forme des éléments concassés dépend, outre du type de la roche et de stratification et de la méthode de concassage utilisée. Les graviers sont satisfaisants pour autant que leur forme le soit et ils peuvent être utilisés dans les bétons à hautes performances, mais l'adhérence matrice- granulats peut être incorrecte lorsque la texture de surface de gravier est très lisse. Du point de vu de leur forme et de leur résistance, les meilleurs granulats pour fabriquer des BHP sont probablement les graviers glaciaires parce que ils sont généralement constituaient de particules qui correspondent aux partie les plus dures des roches qui ont été écrasé par les glaciers et qu'ils ont été bien nettoyés par les eaux qui les ont traversées lors de la fonte des glaciers. Malheureusement, on ne trouve pas partout des graviers glaciaires ou pluvio- glaciaires **[02]**.

I.4 Conclusion

Bien que les différents caractéristiques des BHP offrent plusieurs avantages par rapport aux bétons usuels, il y a encore place à l'amélioration, les BHP, comme tous les autres matériaux, ont encore des points faibles. En outre, il existe et il va toujours exister de nombreux cas où un béton de 20 à 30 MPa sera le béton idéal pour répondre à des besoins particuliers : le développement des BHP n'éliminera pas l'utilisation des bétons usuels.

Avantages d'utilisation des BHP pour un propriétaire

L'objectif final pour un propriétaire est d'avoir un retour maximal sur son investissement durant toute la durée de vie d'une construction. Dans la plupart des cas, la nature du matériau utilisé pour construire une structure a peu d'intérêt pour le propriétaire en étant que ce matériau satisfasse les exigences fonctionnelles qu'il s'est fixé et cela à un prix acceptable. Par contre, certaines exigences économiques des propriétaires peuvent influencer fortement le choix final d'un matériau structural.

Avantages d'utilisation des BHP pour un concepteur

Le BHP n'a pas été toujours sélectionné pour sa résistance à la compression. Par fois, les concepteurs l'utilisent pour son module élastique très élevé, pour sa grande durabilité ou sa meilleure imperméabilité ou pour toute combinaison de plusieurs de ces facteurs.

Avantages d'utilisation des BHP pour un entrepreneur

Dans certains projets, l'entrepreneur a la possibilité d'offrir des solutions alternatives et il peut recommander d'utiliser un matériau qui, selon son expérience, est plus économique.

Avantages d'utilisation des BHP pour l'environnement

Chaque fois que l'on utilise le BHP à la place d'un béton usuel, il est facile de démontrer que l'on utilise de façon beaucoup plus efficace le pouvoir liant du ciment Portland. Le rapport eau/ciment élevé des bétons usuels conduit à fabriquer un matériau poreux ayant une microstructure et une durabilité particulièrement faible. Puisque la production du ciment Portland consomme beaucoup d'énergie et dégage pratiquement autant de CO_2 que de ciment produit, fabriquer et utiliser un béton de rapport eau/ciment élevé est un geste de gaspillage d'une matière première a très haut contenu énergétique.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATETIAUX UTILISES

II.1 Introduction

Les propriétés et les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application. Ce n'est qu'en évaluant ou en mesurant exactement les qualités et les caractéristiques les plus importantes, que nous pourrons confectionner des bétons qui nous permettent de construire des édifices et ouvrage solides, durables et haute efficacité économique et technique. Toutes les caractéristiques des matériaux de construction, d'après l'ensemble de leurs indices, sont divisés en caractéristiques physiques, chimiques pu mécaniques.

Les caractéristiques de chaque composant de ces constituants, la démarche adoptée ainsi que la méthodologie d'essais et le mode opératoire sont présentés.

II.2 Le ciment NF P 15-301:

Le ciment que nous avons utilisé pour l'exécution de tous les travaux expérimentaux est un ciment Portland de Classe *CPJ/CEMII/42.5* fabriqué à l'usine de *EL-Hamma* (région de Constantine) conformes à la norme *NF P 15-301* norme Algérienne *NA 442* équivalant au *CEM II ENV. 197***.**

Les différentes caractéristiques que ce soit Chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même « *E.R.C.E* ». Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants. Nous notons que toutes les caractéristiques du ciment *CPJ/CEMII/42.5* manipulé répondent aux normes. Toute la quantité de ciment utilisée lors des séries d'expérimentation a fait l'objet d'une seule commande et conservé dans un milieu sec et à l'abri des écarts de température.

Tableau II.1- Composition chimique du clinker**.**

Composition chimique du clinker											
SiO_2	***Al_2O_3***	***Fe_2O_3***	***CaO***	***MgO***	***SO_3***	***Na_2O***	***K_2O***	***chlorures***	***CaO libre***	***Résidus insolubles***	***P.A.F***
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

Tableau II.2- Composition minéralogique du clinker produit à l'E.R.C.E d'EL-Hamma.

Composition minéralogique du clinker		
Éléments	***Abréviation***	***Teneur (%)***
Silicate tri calcique	***C_3 S***	***56,60***
Silicate bi calcique	***C_2 S***	***22,98***
Aluminate tricalcique	***C_3 A***	***9,87***
Alummino-ferrite tetracalcique	***C_4 AF***	***8,25***

Tableau II.3- propriétés physiques du ciment.

propriétés physiques du ciment					
Temps de prise T_D		*Expansion le CHATELIER* ***(E)***		*Surface spécifique (BLAINE)*	*Consistance normale*
Début $\mathbf{T_i}$	Fin $\mathbf{T_f}$	à chaud	à froid		
2h 50min	**4h 06min**	**2,90**	**1,65**	**3891**	**26,91**

TableauII.4- Résistance mécaniques du ciment (bars).

Résistance mécanique du ciment (bars)			
Essais	*Age*		
	2jours	*7jours*	*28jours*
Compression	**143,2**	**266,4**	**433,1**
Flexion	**35,7**	**58,3**	**77,9**

II.3 Caractéristiques des granulats

II.3.1 Essais sur granulats

II.3.1 .1 Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (*H1 et du sédiment + floculant H2*).
L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{ES= H_1/H_2 *100} \qquad \text{II.1.}$$

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable, la présence d'un excès d'argile peut provoquer une augmentation du retrait et une forte demande en eau ce qui entraînera une baisse de résistance mécanique, cependant un manque total de fines conduit à des bétons peu maniables, ségrégations et de faibles compacité. L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible. Pour les bétons dont fc28 > 30MPa**,** la spécification du fascicule *65A* exige un *ESV> 80***.**

II.3.1 .2 Module de finesse (NF P 18-304)

Le module de finesse d'un sable est égale au *1/100*^{e} de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : *0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.* Le module de finesse d'un sable est un paramètre qui détermine la finesse du sable. Un sable grossier (*2.8 <*M_f*< 3.2*) favorise l'obtention d'une bonne résistance mais risque d'entraîner

une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation, quant au sable fin ($1.8 < M_f < 2.2$) il facilite la mise en œuvre du béton au détriment de la résistance.

Pour un béton à hautes performances, vu l'importante quantité de fines (ciment et ajout minéral), il est préférable d'utiliser un sable dont son module de finesse est compris entre *2.7 et 3.0* [**15**].

II.3.1 .3 Masse volumique

Pour étudier la formulation d'un béton, il est plus évident de travailler avec les quantités de Composants d'après leur masse plutôt qu'avec leur volume. Donc il est indispensable de connaître la masse volumique absolue du gravier pour pouvoir convertir les volumes (**L**) obtenus en masses (**kg**). La masse volumique absolue correspond à la masse de matière pleine excluant tous vides à l'intérieur des grains**.**

II.3.1 .4 Coefficient d'aplatissement (Norme NF P 18-561)

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus au moins massive des granulats. Le coefficient d'aplatissement «A» caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension (G) et de leur épaisseur (E), est par définition le pourcentage d'élément tels que G/E > 1.58 [**16**].

La norme *NF P 18 – 561* spécifie pour les bétons de $f\,c_{28} \geq 36\ MPa$ une valeur de $A \leq 20\%$.

II.3.1 .5 Coefficient d'absorption des granulats

Le coefficient d'absorption des granulats est le rapport de l'augmentation de leur masse provoquée au bout de 24 heures par une imbibition à l'eau par rapport à leur masse sèche. Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. En plus lors du malaxage du béton, l'emploi des granulats à fort coefficient d'absorption peut provoquer un léger raidissement du béton.

Le fascicule 65A stipule pour les bétons de $fc_{28} \geq 30\ MPa$, un coefficient d'absorption d'eau Ab $\leq$2%.

La détermination du coefficient d'absorption d'eau Ab est calculé comme suit :

$$\mathbf{Ab\ (\%) = M_2\text{-}M_1/M_1 * 100} \qquad \text{II.2.}$$

Avec :

$\mathbf{M_1}$: Poids de l'échantillon séché ;

$\mathbf{M_2}$: Poids de l'échantillon après saturation.

II.3.1 .6 Essai Los Angeles (NF P 18-573)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$\mathbf{L\ A = p*100/5000} \qquad \text{II.3.}$$

Les granulats sont qualifiés comme suit :

- LA < 15 ……....très bon ;

- 15 ≤ LA 20 …….... bon à moyen ;

- 20≤ LA 30 …….... moyen à faible ;

- LA ≥ 30 …….... médiocre.

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon ; le fascicule *65A* indique la valeur *LA ≤25%* caractéristique *fc28≥ 30 MPa* pour les bétons dont la résistance.

Le gisement *El-Khroub* occupe la partie sud-ouest du massif Oum Settas au nord-est Constantine. Les caractéristiques physico-chimiques des granulats sont les suivantes :

Tableau II.5- Caractéristiques chimiques des granulats utilisés**.**

SIO_3	AlO_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	PF
0.5	*0.25*	*0.05*	*55.04*	*0.39*	*0.25*	*0.015*	*0.12*	*42.94*

Tableau II.6- Caractéristiques mécaniques et physiques des granulats utilisés.

Propriétés mesurées	***Granulats calcaires concassés***		
	0/4	***4/8***	***8/16***
Équivalent de sable (%)	***81***	/	/
Module de finesse	***2.86***	/	/
Masse volumique absolue (g/cm^3)	ρ_s ***=2.5***	ρ_{G1} ***=2.47***	ρ_{G2}***=2.47***
Porosité gravillons	/	***e = 3.05***	***e=7.54***
LA (Les Angles)	/	***30,862***	***31,35***
MD (Micro Deval)	/	***25.67***	***24.50***
Propreté superficielle	/	***1.5***	***1.16***
Coefficient d'aplatissement (%)	/	***14.82***	***12.88***
Coefficient d'absorption	/	***3.05***	***3.05***
Impuretés Prohibés	***Non décelées***	***Non décelées***	***Non décelées***

II.3.1 .7 Caractéristiques de la roche

Tableau II.7- Caractéristiques physiques de la roche**.**

Poids volumique	*Poids spécifique*	*Absorption d'eau*	*Porosité moyenne*
2.59g/cm^3	*2.71g/cm^3*	*0.9%*	*4.56*

Tableau II.8- Caractéristiques mécanique de la roche.

Charge de rupture compression	*Résistance mécanique*
176.3 KN	*698.2Kgf/cm^3*

II.4. Caractérisation des additions fines

II.4. 1 Caractéristiques des fumées de silice

On rapporte quelques mauvaises expériences avec certaines fumées de silice et l'on décrit même une fumée de silice pouzzolane. D'après certains auteurs, cette situation s'explique par le fait que, dans l'industrie du silicium et du ferrosilicium [**02**].

La fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse, la teneur en SiO_2 varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. La fabrication d'alliages de silicium comprenant des métaux non ferreux telle que le ferrochrome et le ferromanganèse conduit également à la formation de fumées de silice, mais leur aptitude d'être utilisées dans la confection des bétons n'a pas encore été établie [**15**].

Les alliages de ferrosilicium courants ont des teneurs nominales en silicium de 50,75 et 90%. À 48%, le produit est considéré, comme silicium métal. Étant donné que le même four peut produire différents alliages, il est important de connaître la provenance des fumées de silice utilisées dans le béton. En particulier, le ferrosilicium avec une teneur en silicium de 50 % donne une fumée de silice dont la teneur en silice est d'environ 80% seulement.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse, mais elle est un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est nettement moins dense que le ciment Portland dont la densité varie de 3 à 3.2.

Les particules de fumée de silice sont extrêmement fines, elles se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.1µm et 1 ou 2µm, de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen. Ces particules sont tellement fines que leur surface spécifique ne peut être déterminée en utilisant la méthode Blaine. Elle doit être déterminée par adsorption

d'azote (*méthode BET*). Les valeurs typiques que l'on retrouve dans la documentation sont comprises entre *13 000 et 25 000 m²/kg* [**15**].

la fumée de silice est disponible sous forme de microboulettes, c'est-à-dire des agglomérations de particules individuelles produites par aération, dont la masse volumique est de *500 à 700 Kg/m3*. La fumée de silice est aussi présentée sous forme de boue constituée à masse égale d'eau et de fumée de silice. La masse volumique de cette suspension est d'environ *1300 à 1400 kg/m3*. La suspension est stabilisée et présente un pH d'environ 5,5, sans que cela n'entraîne de conséquences lorsqu'on l'utilise dans le béton[**07**].

II.4.1. 1 Mode d'action des fumées de silice dans le béton

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement aux deux fonctions suivantes :

A/ Effet physique

Cet effet est connu aussi sous le nom d'effet filler ou encore effet granulaire, les particules de fumée de silice sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciments eux même et les petits vides entre les grains fins du sable et du ciment. Ceci rend la structure de la matrice du béton plus homogène et beaucoup plus étanche ; il en résulte une meilleure compacité et une plus faible porosité. La diminution de la perméabilité à l'eau augmente la résistance contre le gel/dégel et améliore la résistance contre les agressions chimiques (sulfates, chlorures, etc.…).

B/ Effet pouzzolanique

La fumée de silice est l'ajout pouzzolaniques le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Les particules *SiO2* amorphes de la fumée de silice se précipitent sous forme de silicate de calcium hydraté (**C-S-H**) avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment. Ce qui se traduit par une forte augmentation de la résistance mécanique tant à jeune âge qu'à terme.

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolaniques conduit à une diminution du pH par rapport à un béton dégagé de silice. C'est la raison pour la quelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de la fumée de silice à 10%, par rapport au poids du ciment, afin de garantir la protection anticorrosion des armatures [**15**].

II.4.1.2 Dosage en fumée de silice

Du point de vue de la résistance à la compression et de la perméabilité, on peut démontrer que, tout au mois dans le cas des BHP de classe I, les gains de résistance n'augmentent plus de façon significative lorsque le dosage en fumée de silice augmente au-delà de 10%, au- delà d'un tel dosage, toute addition supplémentaire de fumée de silice entraîne des gains de résistance relativement faibles. En outre, au coût additionnel de cette fumée de silice, il faut ajouter le coût du superplastifiant qui sera nécessaire pour disperser cette fumée de silice additionnelle.

Même si l'on trouve dans la documentation des études scientifiques et économiques bien argumentées qui permettent de définir le dosage optimal en fumée de silice dans le BHP, il est bon de ne jamais dépasser un dosage compris entre 8 et 10% da la masse.

Les différents oxydes constitutifs de la fumée de silice utilisée sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.9- Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice.

Composition chimique en %						
SiO_2	***Al_2O_3***	***Fe_2O_3***	***Na_2O***	***K_2O***	***SO_3***	***Impureté***
92.1	*0.25*	*0.79*	*0.17*	*0.96*	*0.36*	*5.37*

Tableau II.10- Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

Masse volumique apparente (g/cm^3) ***SSB***	***0.271***
Surface spécifique (BET) (cm2/g)	***> 150000***
Type	***Ferro- silicium***
Couleur	***Grise***

II.4. 2 Caractéristiques de pouzzolane NF EN 1858

Les propriétés relatives et universellement reconnues du béton de pouzzolane, à savoir la forte inertie et la très bonne tenue aux températures et aux agents agressifs, ont conduit les fabricants les plus performants à les mettre en valeur dans la fabrication de conduits de fumée certifiés selon les exigences de la norme *NF EN 1858.*

II.4. 2.1 Mode d'action des Pouzzolanes dans le béton

Les pouzzolanes sont des matériaux qui, par réaction avec la portlanidite, forment des hydrates de type **C-S-H**. La réaction chimique qui se produit est propre à chaque matériau pouzzolane. Ils permettent de lutter contre la détérioration par le gel d'ouvrages en béton en apportant la modification suivant :

- Réduction de la perméabilité du matériau ;
- Réduction de la taille des pores ou la porosité totale;
- Réduction du pourcentage de $Ca(OH)_2$.

II.4.2 .2 Les propriétés physiques

la surface spécifique, mesurée par adsorption d'azote, peut atteindre *50 000* m^2/kg, même si la taille des particules est grande : de *10 à 75* μm ; la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel [**20**].

II.4. 2. 3 La pouzzolane naturelle NF P18-308

Elle provient du gisement Bouhammidi de *Beni caf (Algérie)*. Ses caractéristiques physiques et chimiques sont données sur les(tableaux ,II.11 et II.12)

Tableaux II.11- caractéristiques chimiques de pouzzolane.

Composant	***Symbole***	***Unité***	***Teneures***
La silice	SiO_2	*%*	***46.60***
L'alumine	Al_2O_3	*%*	***17.50***
L'oxyde de Fer	Fe_2O_3	*%*	***9.92***
La chaux	CaO	*%*	***10.16***
La magnésie	MgO	*%*	***2.40***
Les sulfates	SO_3	*%*	***0.40***
Les chlorures	Cl	*%*	***0.00***
Les oxydes de potassium	K_2O	*%*	***1.47***
Les oxydes de sodium	Na_2O	*%*	***3.23***
Les pertes au feu	***PF***	*%*	***5.30***
Total			***99.98***
L'anhydrite carbonique	CO_2	*%*	***1.66***
L'eau de combinaison	H_2O	%	**3.64**

Tableau II.12- caractéristiques physiques de pouzzolane.

Caractéristiques	***Valeurs***
Surface spécifique BLANE de poudre (cm^2/g) ***SSB***	***3560***
Masse volumique absolue (g/cm^3)	***2.75***
Masse volumique apparente (g/cm^2)	***1.02***
Porosité (%)	***57.1***
Absorption (%)	***32***
Humidité (%)	***2.5***
Pouzzolanicité (%)	***85***

II.4. 2 .4 Réactivité

c'est l'aspect chimique de la fixation de la chaux alors que l'activité pouzzolanique s'intéresse à l'aspect mécanique qui se traduit par l'évaluation de la résistance. Généralement les pouzzolanes se divisent en trois catégories :

1-Constituants actifs : phase vitreuse plus ou moins altérée ;

2-Constituants inertes : phase cristallisée ;

3-Constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes.

la réactivité des pouzzolanes est fonction de plusieurs facteurs :

- composition chimique et minéralogique;
- état de division ;
- structure et état de surface ;
- dans les ciments pouzzolaniques l'activité est expliquée par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux formée, lors de l'hydratation.

Les tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation des silicates et d'aluminates de chaux hydratés ne suffisent pas à déterminer la réactivité pouzzolanique. En outre la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement du mélange. Vu sa complexité seuls les résultats des essais mécaniques peuvent nous renseigner d'une façon adéquate sur l'évolution des résistances dans le temps.

La pouzzolane comme ajout dans le ciment peut contribuer à l'amélioration de la résistance , car elle renferme des oxydes actifs *(SiO2 A12O3 Fe2O3)* permettant la formation des silicates et aluminates [**14**].

II.4. 3 Caractéristiques de laitier à haut fourneau NF P 18-506:

II.4. 3.1 Différents modes d'activation chimique et produits d'hydratation :

On peut utiliser une activation alcaline, une activation sulfurique ou une combinaison de ces deux dernières, mais dans tous les cas, la cristallisation, les composés hydratés, leur formation et leur disposition ne sont pas identiques. Les systèmes des trois hydratés compatibles entre eux déterminer sur le diagramme ternaire chaux-silice-alumine, un mode de division : les domaines triangulaires (figure II.1) cependant quelque soit l'activant utilisé, le silicate de calcium hydraté **C-S-H** est toujours présent [**21**].

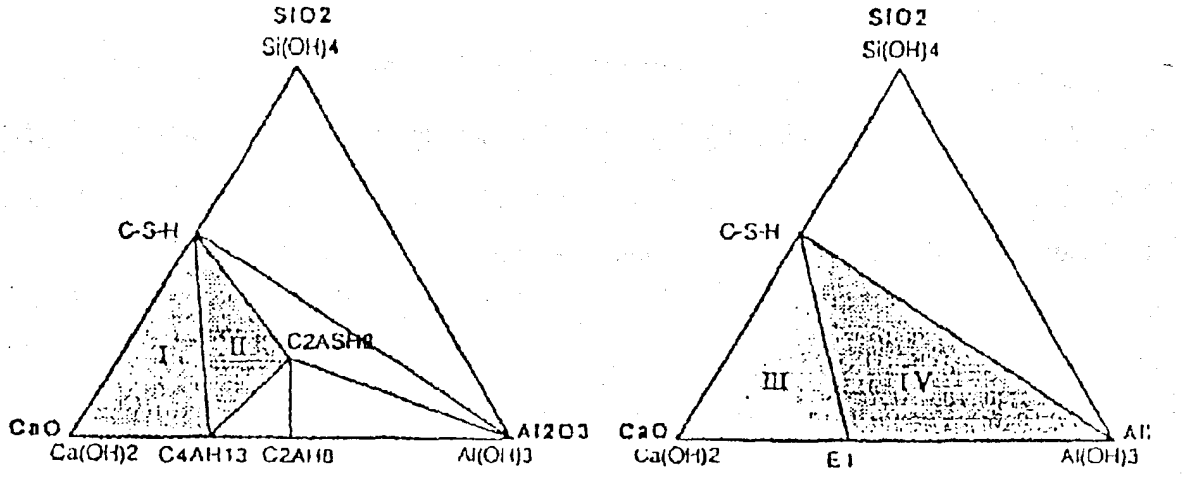


Figure II.1 - Triangulation du diagramme ternaire d'hydratation du laitier.

Il existe trois modes d'activation chimique :

- ❖ Activation alcaline ;
- ❖ Activation sulfatique ;
- ❖ Activation calcio- salfatique (ou sodo- sulfatique).

II.4. 3. 2 Les normes appliquées en Algérie

conformément à l'instruction Ministérielle *N° 0016 septembre 1989,* les règlements techniques et normes de construction retenus pour les liants hydrauliques et en usage en Algérie à titre transitoire sont les normes *AFNOR (NF).* La norme distingue les différents catégories de ciments ci-après dans lesquelles les pourcentages indiqués s'en tendent tolérances comprises et avant incorporation du gypse:

a)- *(I) Ciment Portland artificiel (CPA) :* contenant au moins 95% de clinker, le reste étant un

constituant secondaire.

b)- *(II) Ciment Portland composé :* contenant au moins 65% de clinker, l'ajout pouvant être constitué de laitier de haut fourneau, de fumée de silice, de pouzzolane, de cendre volantes, des schistes calcinés ou de calcaire. La quantité totale d'ajout est donc limitée à 35%. L'ajout pouvant être l'un des produits cités ou un de leur mélange .

c*)-(III) Ciment de haut fourneau :* contient entre 36 et 95 % de laitier, le reste étant du clinker.

d)-*(IV) Ciment pouzzolanique :* contient entre 11 et 55 de pouzzolane, le reste étant du clinker.

e*)-(V) Ciment composé :* contient de 20 à 64 %de clinker, de 18 à 50 % de laitier et de 18 à 50 % d'un mélange de pouzzolane et de cendre volantes siliceuses [**21**].

II.4. 3.3 Quelques propriétés physiques du laitier

Dans cette paragraphe nous avons présentant des qulques propriétés et leur fonction dans le tableau ci-dessous Tableau II.13 :

Tableau II.13 :les propriétes de laitier et leur fonction .

propriéte	***fonction***
La granulométrie	*Le laitier cristallisé ou rocheux est de tout venant dont la granulométrie est provoquée par le retrait thermique et la manutention en cours de reprise de la fosse. Ce tout venant est par la suite concassé et criblé pour obtenir les tranches granulométrique nécessaires pour son utilisation.*
La couleur	*Grisâtre.*
La propreté	*Vu son origine, le laitier concassé ne contient ni argile, ni matière organiques.*
La porosité	*Au cours du refroidissement, les gaz occlus provoquent une légère expansion du laitier, ce qui donne une structure poreuse. Il en résulte des qualités très intéressantes. Il a l'aptitude à conserver l'humidité et la restituer progressivement.*
L'angularité	*Le laitier concassé ou rocheux possède un bon angle de frottement interne qui assure une excellente stabilité mécanique des remblais.*

II.4. 3.4 Propriétés physiques du laitier granulé broyé

Tableau II.14- Temps de broyage et surface blaine du laitier vitrifié.

Temps de broyage (heures)	*Surface spécifique Blaine (cm^2/g)*
T_b= 3	**SSB= 3750**

Caractéristique physique de laitier vitrifié

Caractéristiques	*Valeurs*
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	**SSB= 3750 cm^2/g**
La porosité	**e = 0.5**
Le volume	**V=1.96**
La densité	**ρ=2.92 g/cm^3**
La masse	**m =2.86 g**

II.4. 3.5 Propriétés chimiques du laitier granule broye

En provenance du complexe sidérurgique D'EL Hadjar. Les cractéristiques chimiques sont reportées sur le tableau II.15

Tableau II.15- Caractéristique chimique de laitier vitrifié.

CaO%	*Al2O3%*	*Fe2O3%*	*SiO2%*	*MgO%*	*SiO3%*
44.73	*7.62*	*1.44*	*36.26*	*6.46*	*0*

D'après cette analyse, on peut prévoir l'activité hydraulique du laitier en appliquant les formules souvent citées dans la littérature voir le tableau II.16 suivant :

Tableau II.16- L'activité hydraulique du laitier.

	Formule	*Valeur*	*Commentaitre*
1	**CaO/SiO2**	**1.235**	Marginale
2	**CaO+MgO/ SiO2**	**1.412**	Bon
3	**CaO+MgO/ SiO2+Al2O3**	**1.166**	Bon
4	**Cao+0.56Al2O3+1.4MgO/ SiO2**	**1.504**	Marginale
5	**Cao+Al2O3+MgO/ SiO2**	**1.621**	Très bon

Donc *: I= CaO/SiO2 =1.235> 1 ; et CaO+MgO/ SiO2 =1.412<1.5*

Ce laitier est donc basique, ce qui le rend apte à l'activation Alcaline.

II.4. 3.6 Dosage du laitier à haut fourneau

Selon la documentation, les laitiers ont été jusqu'à présent utilisés à des dosages variant entre 15 et 30%. Ce dosage peut varier selon les régions et selon les conditions climatiques, par exemple, le dosage peut être diminué à 15% durant l'hiver de façon à obtenir des résistances relativement élevées à jeune age pour décoffrer le plus vite possible et être augmenté jusqu'à 30%.

Cependant, dans le futur, on utilisera très certainement des dosages en laitier supérieure puisque, lors d'un essai de chantier et dans une centrale à béton. pour produire un BHP ayant une résistance à la compression à 91 jours de 130MPa en utilisant un liant composé de 60 % de laitier, 30% de ciment Portland et 10% de fumée de silice. En général, selon la résistance visée, l'activité du laitier et les facteurs climatiques déterminent le taux d'utilisation d'un laitier [**02**].

II.4. 4 Caractéristiques Filler de calcaire NFP 18-508

Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisé pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton. L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixée [**23]**.

Les addition calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ ou sélection, provenant de gisement de roches pouvant être dolomitiques, massives ou meubles, dont les caractéristiques sont définies par la norme citée ci-dessous.

Ce type d'addition peut jouer plusieurs rôles en tant :

- ✓ Que complément de la granulométrie (augmentation de la compacité, amélioration de la cohésion, accroissement de la maniabilité, ….) ;
- ✓ Qu'activant améliorant les propriétés physico-chimiques de la pâte liante **[24**].

Le gisement *El-Khroub* occupe la partie sud-ouest du massif Oum Settas au nord-est Constantine. Il est constitué de calcaire d'origine biochimique Nérétique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Tableau II.17- Les caractéristiques physiques et chimiques de filler.

Cractéristiques chimiques		***Cractéristiques Physiques***	
CaCo2	*99%*	*Dureté (Mohs)*	*3*
CaO	*55.66%*	*Poids spécifique*	*2.7*
SiO2	*0.04%*	*Densité apparente non tassée*	*0.82g/cm²*
Na2O	*0.026%*	*Blancheur (CR310MINOLTA)*	*L:4.81 a+0.34 b+2.18*
Al2O3	*0.04%*	*Prise d'huile (NF.T30.022)*	*26g/100g de poudre*
MgO	*0.33%*	*Humidité à l'ensachage*	*0.02%*
Fe2O3	*0.013%*	*Indice de réfraction*	*1.71*
Perte de feu	*43%*		
PH	*9*		
Cyanure	*0.045µg/gr*		
Mercure	*0.35µg/gr*		
Arsenic	*0.08µg/gr*		
Fluor	*0.02mg/gr*		
Chlorure	*0.001mg/gr*		

Notes de l'opérateur: Valeur de bleu (Fillers) **MBf = 1.67gr/Kg**

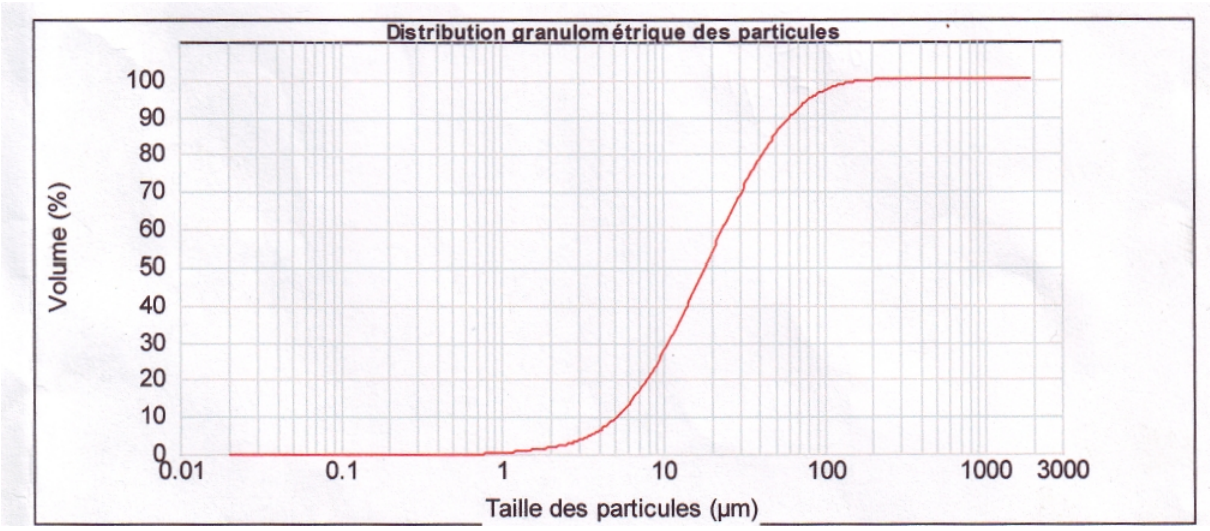


Figure II.2- Distribution granulométrique des particules.

II.4. 4.1 Principale utilisation

- Peinture mate à phase aqueuse et phase solvant;
- Peinture en poudre hydrodispersible;
- Colle;
- Pate à chewin-gum;

- Fabrication de craie;
- Pate à modeler;
- Améliorant pour le pain.

II.4. 4.2 Conditionnement

En vrac;

Big-bag (1tonne);

Palettes houssées (48 sacs de 25Kg).

II. 5 Super plastifiant– haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2 [25]

II. 5. 1 Description

Le *MEDAFLOW 30* est un Superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le *MEDAFLOW 30* permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de Superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le *MEDAFLOW 30* ne présente pas d'effet retardateur.

II. 5 .2 Caracteristiques

- Forme ..... Liquide ;
- Couleur ..... Jaunâtre ;
- PH ..... 6 – 6,5 ;
- Densité .....1,07 ± 0,01 ;
- Teneur en chlore ..... < 1g/L ;
- Teneur en extrait sec ……..40%.

II. 5. 3 Propriétés et Effete

Grâce à ses propriétés le *MEDAFLOW 30* permet :

Tableau II.18 : les propriétés de super plastifiant sur le béton

Sur béton frais	***Sur béton durci***	***Domaines d'application***
- l'obtention d'un E/C très faible ; *-l'amélioration considérable de la fluidité;* *- une très bonne maniabilité ;* *-un long maintien de l'ouvrabilité ;* *- d'éviter la ségrégation ; et* *- de faciliter la mise en oeuvre du béton.*	*-augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;* *- de diminuer la porosité ;* *- d'augmenter la durabilité* *- de diminuer le retrait et le risque de fissuration.*	*-Bétons à hautes performances ;* *- Bétons auto plaçant* *- Bétons pompés ;* *- Bétons précontraints ;* *-Bétons architecturaux.*

II. 5. 4 Dosage:

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherché.

II. 5. 5 Mode d'emploi

Le *MEDAFLOW 30* est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduit.

II. 5. 6 Conditionnement et stockage

Le *MEDAFLOW 30* est conditionné en bidon de *11kg* et fût de *210kg*.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (**5°C < t < 35°C**).

II. 5. 7 Essais de laboratoire

Compte rendu d'essais conformes aux normes *NA 774 et NA 819* établi par le *CNERIB* en *Avril 2005***.**

II 6. L'eau de Gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est de l'eau potable. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont représentés dans le tableau II.18 selon la norme *NF P18-303* (NA 1966) relative au concentration en matières en suspension et sel dissout.

Tableau II.19 – Résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée.

Ca	*Mg*	*Na*	*K*	*Cl*	*SO4*	*CO3*	*NO3*	*insoluble*
116	*36*	*80*	*3*	*140*	*170*	*305*	*5*	*786*

II. 6..1 Technique des essais :Norme NF P 18-303

A/ Physiques

- ✓ Pour obtenir la proportion des impuretés en suspension dans l'eau, prélever deux litres de liquide dans un volume d'eau bien brassée.

Filtrer cette eau avec un filtre en proportion, parfaitement sec, dont on aura au préalable déterminé la masse.

- ✓ Filtrer l'eau prélevée jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement claire.
- ✓ Sécher le filtre et le résidu à 110 °C jusqu'à masse constante.
- ✓ L'augmentation de la masse du filtre donnera la masse des impuretés en suspension.

B/ Chimiques

- ✓ Pour déterminer la proportion des impuretés dissoutes, évaporer l'eau précédemment filtrée jusqu'à séchage complet et peser le résidu.

- ✓ Sa masse rapportée à 2 litres représentera la masse des sels dissous.

II. 6. 2 Méthodes d'analyse d'eau

Pour le gâchage du mélange de béton, il faut utiliser de l'eau qui ne contient par d'addition affectant le durcissement du ciment ou bien altérant la qualité du ciment.

Au cours de la préparation du mélange du béton, il est recommandé d'utiliser de l'eau potable dont la qualité ne provoque pas de doute. Si on est obligé d'utiliser, pour le gâchage, de l'eau des bassins, il est nécessaire de faire le contrôle préalable de sa qualité, le laboratoire contrôle l'acidité d'eau et de la teneur en sulfates.

II. 6 .3 Prélèvement des échantillons d'eau

Le laborantin doit prélever l'eau de sorte que son composé ne soit accidentel. C'est pourquoi il est déconseillé de prélever l'eau des bassins juste après la pluie. Si on prend de l'eau des puits ou l'eau de robinet, il faut laisser couler pendant 5mm**.** Après, on fait le prélèvement dans le récipient bien propre. Il est préalable de prélever les échantillons d'eau de 3litres dans des bouteilles avec bouchon. Après cela, on colle la fiche correspondante. Les échantillons sont envoyés au laboratoire pour analyse de l'acidité et de la teneur en sulfates.

II 6. 4 Essai de l'acidité de l'eau

On verse de l'eau dans une éprouvette bien propre, lavée préalablement avec de l'eau distillée ; on plonge un papier tournesol bleu pour quelque temps. Si le papier tournesol de devient rose, ça veut dire que la teneur en acide dans cette eau est élevée.

II 6 .5 Essai des sulfates contenus dans l' eau

Cette méthode s'effectue de la manière suivante : on verse l'eau, avec quelques gouttes de solution à 10% d'HCI, dans une éprouvette de 150 à 200 ml. On fait bouillir ensuite au compte-gouttes la solution de 10 % de chlorure de baryum. le précipité qui descend prouve l'existence des sulfates ou des acides est assez considérable, alors il est nécessaire de faire une analyse chimique complète.

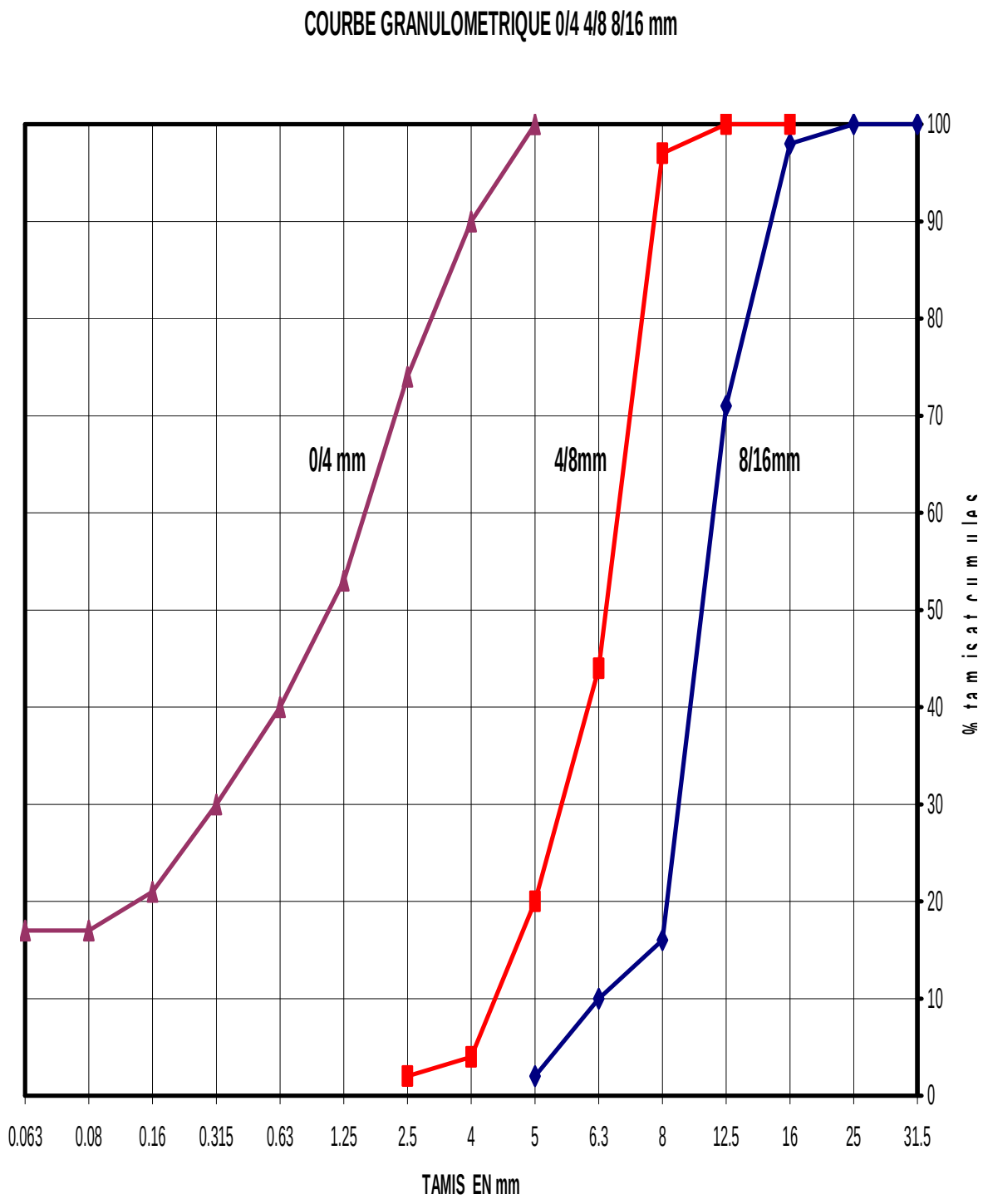


Figure II.3- Courbe granulométriques des granulats **0/4 ; 4/8 ; 8/16**.

II .7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail et leurs constituants.

Les caractéristiques géométriques, mécaniques, physiques et chimiques des granulats nous permettant de conclure sur leur conformité.

La composition chimique a montré que le laitier est basique (le coefficient de basicité est proche de l'unité), donc il est actif.

Lorsque le laitier est simplement mélangé à l'eau, la dissolution des ions est nulle, ce qui confirme que le laitier n'est soluble qu'en présence d'un activateur.

La fumée de silice présente un effet pouzzolanique, néanmoins, c'est a court terme un matériau inerte. Les tailles très petites de ses graines 0.2µm en moyenne, lui fournissent un rôle rhéologique particulier.

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé l'hydratation du ciment Portland.

L'utilisation des fumées de silice et des ajouts cimentaires, lorsqu'ils sont disponibles à un prix compétitif, est bénéfique lorsque l'on fabrique des BHP parce que l'on peut ainsi réduire les coûts de fabrication du BHP**.** Le dosage de ces ajouts cimentaires dépend de la résistance à jeune age.

Si tous les critères de sélection qui ont été présentés dans ce chapitre sont appliqués avec soin, on devrait diminuer la quantité de travail expérimental nécessaire pour développer une formulation rhéologique des BHP qui soit à la fois économique et qui satisfasse les exigences rhéologiques et mécaniques que l'on s'était fixées.

CHAPITRE III

RHEOLOGIE DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

III.1 Introduction

Le coulis est mélange fluide à base de charges fines inférieures à 0.3mm, de liants hydrauliques et d'adjuvants. Les ciments utilisés sont des CPA ou CPJ.

Les domaines d'utilisation des coulis sont plusieurs. L'utilisation de ces derniers est effectuée en faisant recours à des techniques particulières de mise en œuvre, dont la projection et l'injection. Les travaux d'injection nécessitent des coulis de grande fluidité. Aussi,le coulis peut être vu comme la phase liquide du béton, les tendances expérimentales actuelles vont dans le sens des optimisations des formules de béton à partir d'essais effectués sur les coulis, les essais sur le béton ne viennent que pour des vérifications.

L'essai au Cône de Marsh a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec Superplastifiant Pour la recommandation de L'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances.

III.2. Méthodes d'optimisation des coulis de ciment

On présente ici les règles de formulation des coulis de ciment en fonction des propriétés rhéologiques et mécaniques visées. Dans la pratique, le formulateur doit répondre à un cahier des charges dont le plus simple est composé de quatre spécifications dans les domaines suivants :

- Fluidité ;
- Injectabilité ;
- Stabilité à l'état frais ;
- Résistance mécanique.

Parmi les essais développés pour la caractérisation des fluidités des coulis on retrouve l'essai au **Cône de Marsh**. Ce dernier qui présente une approche simple pour la caractérisation de la fluidité de pâte de ciment contenant des additions minérales et des adjuvants ou non. Pour les coulis fluidifié, il existe toujours un dosage en adjuvant dit «**dosage de saturation** », au- dessus duquel aucune augmentation significative de la fluidité de la pâte ne se produit. Ce dosage peut être exploité pour le choix du type du Superplastifiant et son dosage.

En se basant sur l'approche au Cône de Marsh, nous avons étudié l'influence du rapport Eau/liant, du type et du dosage en additions minérale ainsi que celui de l'adjuvant sur la fluidité des pâtes de ciments. Les résultats obtenus vont dans le sens de la mise au point des coulis et leur formulation pour leurs utilisations comme matériau indépendant, ou` pour les introduire dans une composition de béton en tant que phase suspendant.

III.2.1 Fluidité

Le dosage en superplastifiant doit être proche de la saturation, sans toute fois la dépasser, car il a été montré que son dépassement augmente les risques de sédimentation. Cette détermination est effectuée en recourant aux outils rhéologiques classiques, tels que le viscosimètre à cylindres coaxiaux, ou, plus simplement, le cône de Marsh (*norme EN 445*). On mesure le temps de passage d'un litre de coulis dans un cône, et on trace la courbe d'évolution de ce temps en fonction du dosage en superplastifiant (Figure III.1).

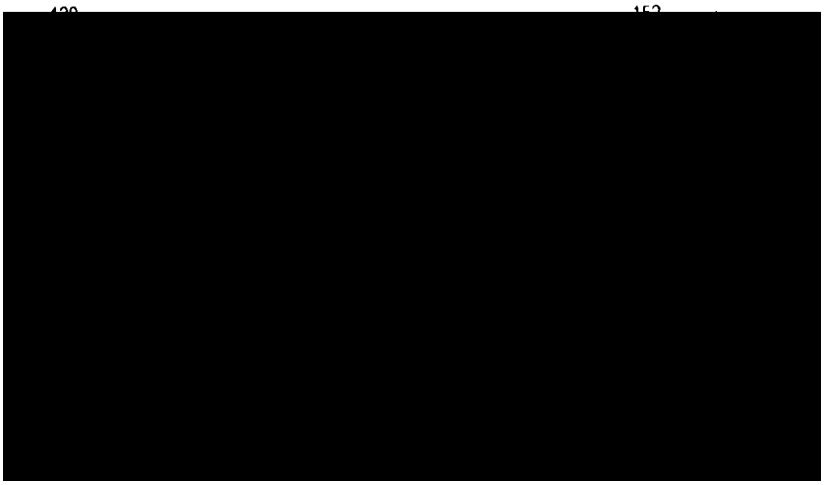


Figure III.1 : Optimisation du dosage en Superplastifiant au cône de Marsh. Temps obtenus pour l'écoulement de 500 ml de coulis un ajustage de 8mm de diamètre sur un ciment contenant 10% de fumée de silice et un Superplastifiant de type polycarboxylate. Le rapport E/L est de 0.32. A droit, schéma du cône de Marsh selon la norme *EN 445*[**26**]**.**

III.2.2 Résistance en compression

La résistance en compression des coulis durcis est assez bien prédite par les modèles de la même famille que ceux proposés par Féret (FigureIII.2). La relation proposée par de Larrard pour la résistance à 28 jours des coulis sans ajout est la suivante:

$$fc_{\varphi 28} = 11.4 R_{c\,28} \left[\frac{1}{1 + p_c \dfrac{e + v_a}{c}} \right]^{2.85} \qquad \text{III.1}$$

Rc_{28} : la classe vraie du ciment à 28 jours, exprimée en MPa, et mesurée selon la norme NF EN 196.1,

e et **c :** désignent respectivement les masses d'eau et de ciment,

v_a : le volume d'air présent dans le coulis, et

p_c : la masse volumique du ciment.

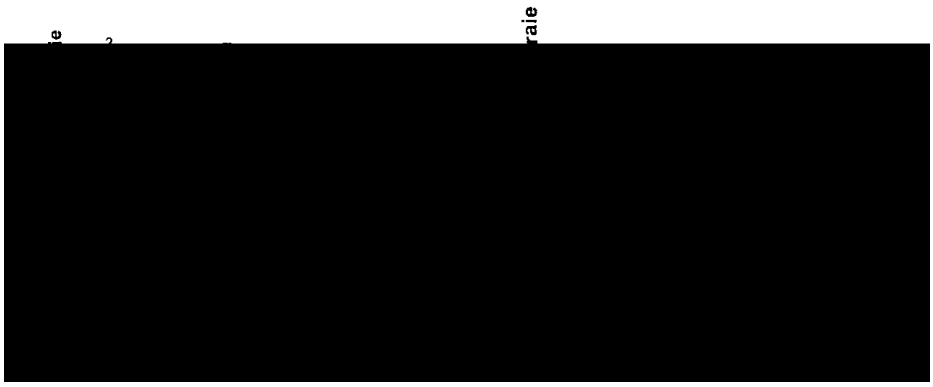


Figure III.2 - Évolution théorique de la résistance en fonction de la concentration volumique en ciment (à gauche) ou de maniére équivalente en fonction du rapport e/c (à droite).

En présence d'additions minérales, on peut utiliser cette même relation, mais en remplaçant la classe vraie du ciment par la résistance du liant équivalent constitué par le ciment et les additions.

III.2.3 L'Approche de mesure de fluidité au Cône de Marsh «NF P 18-358»

L'essai au Cône de Marsh a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec Superplastifiant, en utilisant que se soit, une approche similaire à celle du cône d'écoulement défini dans les norme *ASTM* standard *C 939***,** pour les coulis d'injection ou la recommandation de *L'AFREM* pour la formulation des bétons à hautes performances [**27**].

C'est une méthode simple et pratique pour l'obtention d'une mesure relative de la fluidité d'une pâte, cette mesure est inversement proportionnelle au temps d'écoulement, en mesurant le temps que prend un certaine volume de pâte pour s'écouler du cône à travers une petite ouverture ; la pâte présentant le plus long temps d'écoulement est la pâte moins fluide.

Le point de saturation est défini par le dosage de Superplastifiant au-dessus duquel le temps d'écoulement ne décroît plus d'une manière appréciable. Bien que ce point soit souvent déterminé d'une manière subjective à partir de l'allure de la courbe, une définition plus objective en terme de pente de la courbe est aussi possible.

Le fait qu'une combinaison Ciment- Superplastifiant ne présente pas un point de saturation bien identifiable peut indiquer une incompatibilité. Le dosage de saturation peut être choisi en prenant le point de saturation comme valeur maximale pour :

- un type du ciment ;
- un rapport E/L ; et

- une teneur en additions minérales données.

III.3. Méthodes des coulis

Pour étudier le comportement rhéologique d'un ciment en présence de Superplastifiant on utilise la méthode des coulis qui consiste à mesurer la perte de fluidité d'un coulis du ciment. En effet il existe deux méthodes issues de deux écoles différentes.

III.3.1 Méthode canadienne

Pour étudier la rhéologie des coulis de ciment, le groupe de recherche et d'étude sur le béton à l'université de **SHERBROOKE** a conçu un appareil appelé rhéopompe (figure III.3) mélange de façon énergique un coulis composé d'eau, de ciment et de Superplastifiant ou d'un autre d'adjuvant.

La rhéologie du coulis de ciment est qualifiée par une simple mesure de la fluidité au cône de Marsh (figure III.4, c'est-à-dire par la mesure du temps que prend un litre de coulis préparé pour s'écouler à travers l'orifice inférieur du cône de 5mm d'ouverture).

On introduit l'eau et le Superplastifiant dans un rhéopompe après avoir les mélangés dans la récipient en suit on introduit le ciment progressivement pendant 2 minutes. On arrête alors rhéopompe et à l'aide d'une spatule, on écrase les grumeaux qui peuvent rester collés sur la paroi. Le rhéopompe est remis en marche en malaxant à nouveau le coulis pendant 45 secondes et on prélève, à, l'aide d'un cylindre gradué 1.1litres de coulis pour mesurer son temps d'écoulement au cône de Marsh.

Une première mesure est faite 5 minutes après le début de l'écoulement le coulis est alors placé dans un bouteille que l'on maintient en mouvement continuel à l'aide d'un dispositif mécanique pour empêcher toute sédimentation du ciment. On effectue deuxième mesure de l'écoulement 560 minutes après le début de l'essai.

Figure III.3 : La rhéopompe

Figure III.4 : Le cône Marsh

III.3.2 Méthode Française (L.C.P.C)

Pour la formulation des bétons à hautes performances, en mesure leur consistance à l'aide du cône de Marsh. La nécessité de modifier certains aspects de cet essai, traditionnellement appliqué au coulis d'injection de précontrainte provient de ce que les pâtes des bétons à hautes performances sont généralement plus visqueuses. La gravité est alors souvent insuffisante pour vider complètement le cône, qui se bouche, alors qu'il contient encore du coulis. Par ailleurs, le rétrécissement de la surface libre entraîne par fois la formation de plis qui perturbent l'écoulement. C'est pourquoi il a été choisi ici de limiter le volume de pâte écoulé [**28**].

III.4 Programme expérimental adopté

Nous envisageons dans cette partie de travailler sur la rhéologie des coulis avec additions (fines) disponibles localement. Nous abordons le problème par analogie avec de très nombreuses études menées à travers le monde.

Ce travail de caractérisation et d'optimisation consiste à mesurer le temps d'écoulement sur pâte fluidifiée et non fluidifiée dans un cône entre deux repères et à faire des essais de répétabilité sur pâte pure et avec additions, mettant ainsi au point le coulis de référence, après quoi on teste l'efficacité des fluidifiants disponibles et ce pour déterminer la composition optimale du coulis fluidifié vis-à-vis de l'ouvrabilité.

Nous avons fixé :

1.Le rapport E/L ; et

Nous avons varié :

2.Le type et la teneur des additions (fines) ;

3.Le dosage en Superplastifiant.

III.4 1. Méthode du cône Marsh

Différents cône de Marsh sont utilisés depuis longtemps dans plusieurs secteurs industriels pour apprécier la fluidité de différents types de coulis.Cette méthode consiste à préparer un certain volume de coulis et à mesurer son temps d'écoulement. Les cônes peuvent avoir des caractéristiques géométriques légèrement différentes les unes des autres et le diamètre de l'orifice inférieur peut varier de 5mm à 12.5mm (Figure III.5).

Différentes versions de la méthode du cône Marsh ont été présentées par différents auteurs. La méthode présentée est celle qui est utilisée à l'Université de Sherbrooke depuis plusieurs années.

Figure III.5 : Le cône Marsh utilisé à l'université de Sherbrooke.

Le cône utilisé est un cône de plastique normalisé par l'industrie pétrolière pour mesurer l'écoulement de 1.21s de boues de forage (Figure III.5). Ce cône particulier à été sélectionné par ce que qu'il est commercialement disponible et qu'il est bien adapté aux besoins des études portant sur la compatibilité entre les ciments et les superplastifiants **[02].**

III.4.2 Préparation de l'échantillon et mesure du temps d'écoulement

A) Préparation des coulis

Les coulis ont été préparés dans un malaxeur de marque {**FORM+TEST SEIDNER**} de capacité 5litres**,** en utilisant deux vitesses ; la vitesse rapide 120 tours/m n et la lent 60 tours/m n. Les pesés des constituants ont été effectuées dans la balance électrique de précision ± 0.1 gr.

La préparation de l'échantillon comprend les étapes suivantes :

- Peser l'eau et le Superplastifiant dans le contenant où sera effectué le malaxage ;
- Démarrer le système de malaxage tous en introduisant progressivement la quantité en moins de 1 minute et 90 secondes (Figure III.6).
- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes de façon à nettoyer avec une spatule le ciment qui reste collé les bords du contenant ;
- Malaxer pendant 60 secondes ;
- Mesurer la température ;
- Mesurer le temps qu'il faut pour remplir de coulis un vase gradué de 1litre (Figure III.7) ;
- Placer le coulis dans une bouteille de plastique qui sera ensuite placée entre deux rouleaux de façon à maintenir le coulis homogène et à simuler le transport du coulis ;
- Mesurer le temps d'écoulement à différents instants jusqu' à 60 ou 90 minutes.

A chaque fois, on mesure la température du coulis.

Note :

Dans une version modifiée de cet essai, il à été proposé de faire le coulis en utilisant tous les matériaux ayant une dimension inférieur à 2mm qui se retrouveront dans le BHP **[02].**

Figure III.6: un malaxeur de marque {**FORM+TEST SEIDNER**} de capacité 5litres **[29**].

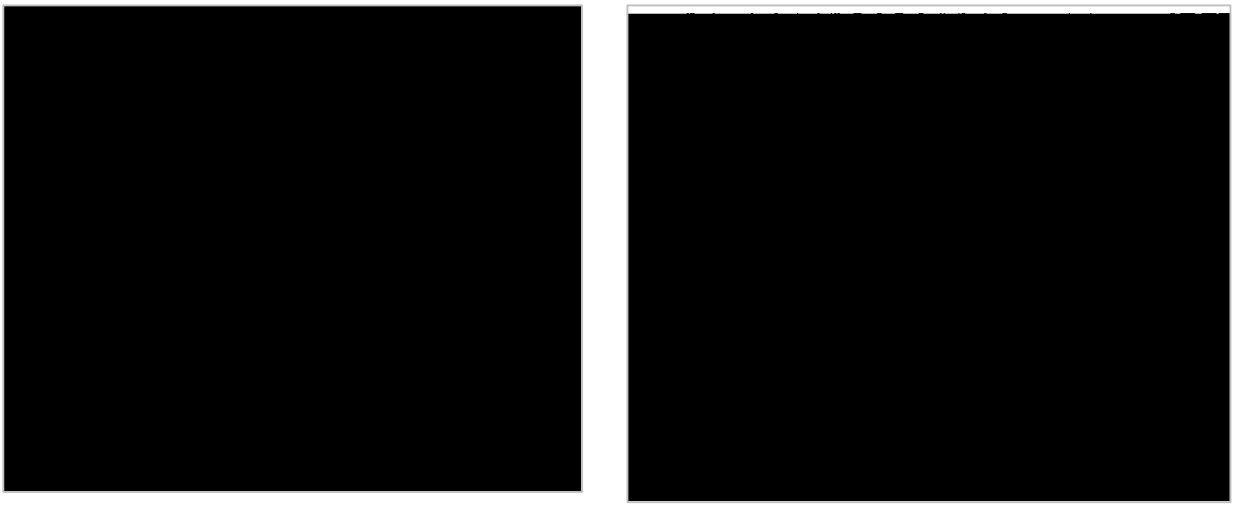


Figure III.7 : Détermination du temps d'écoulement au cône de Marsh

B/Influence sur le moment d'addition du Superplastifiant dans le béton

Le Super plastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification de coulis [**30],** environ 75% de l'eau de gâchage, ou fractionné dans le cas d'eau E/C très bas :

- **1/3** dans l'eau de gâchage ;
- **2/3** vers la fin de malaxage.

Le temps optimal d'addition du Superplastifiant dans le coulis est 2 minutes après le malaxage ciment- additions- eau. A ce moment, le Superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C_3S et C_2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité.

III.4.3 Point de saturation

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en superplastifiants à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le Superplastifiant par rapport à la masse se ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la (Figure III.8).

Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaires est ce que l'on appelle le «point de saturation», c'est- à- dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en Superplastifiant n'à plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en Superplastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

Figure III.8 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiants.

D'un point de vue pratique, il n'est pas intéressant d'étudier la combinaison Ciment/ Superplastifiant sur le coulis qui est trop fluide ou trop épais parce que la plupart des problèmes de compatibilité peuvent être cachés derrière cette trop grande ou trop faible fluidité. L'expérience démontre qu'il est intéressant d'ajuster le rapport eau/ liant du coulis de sort que, à 5 minutes le temps d'écoulement soit comprise entre 60 et 90 seconde.

Dans certains cas cependant, il peut être nécessaire d'utiliser un rapport eau/ liant comprise entre 0.40 et 0.45. S'il faut augmenter le rapport eau/ liant jusqu' à 0.45 pour obtenir un coulis qui a un temps d'écoulement à 5 minutes compris entre 50 et 90 seconde, il préférable de recherche un autre ciment ou un autre Superplastifiant pour fabriquer un BHP**.**

La température du coulis doit demeurer comprise entre 20 et 23 ^{0}C à la fin de la période de malaxage de façon à reproduire les conditions initiales d'hydratation que l'on retrouve dans les bétons. En effet, dans les bétons, la grande quantité de granulats que l'on utilise absorbe la chaleur initiale d'hydratation qui se développe en cours de malaxage. Comme un coulis ne comporte pas de gros granulats, pour réduire cette température, il est nécessaire de refroidir dans certains cas l'eau de gâchage de façon à obtenir un coulis dont la température finale après le malaxage reste comprise entre 20 et 23 ^{0}C**.**

L'expérience démontre qu'il peut être nécessaire d'utiliser de l'eau de gâchage dont la température initiale est comprise entre 5 et 10 ^{0}C**,** ce que donne aussi une idée de la réactivité du ciment dans les conditions de température où il se trouvera dans le BHP **[02].**

III.4.3.1Différents comportements rhéologiques

L'expérience démontre qu'un ciment et un Superplastifiant qui satisfont aux exigences ASTM peuvent présenter des points de saturation qui varient beaucoup (Figure III.9).

Le dosage au point de saturation peut être aussi faible que 0.5% ou aussi élevé que 2.5% ; une valeur de 1% (poly naphtalène) correspond à une valeur moyenne encore acceptable pour un ciment moyen quand le coulis a un rapport eau/liant de 0.35.

Le temps d'écoulement à 5 minutes peut varier aussi sur une assez grande plage de 60 secondes (le temps d'écoulement de l'eau pure est de 32 s ± 1 s) jusqu'à 120 s. Dans certains cas, quand le ciment et le Superplastifiant ne sont pas compatibles, il est impossible de mesurer tout écoulement après 10 ou 15 minutes ; une telle combinaison sera dite incompatible. Quelquefois au contraire, le temps d'écoulement reste le même pendant 1 heure ou 1 heur et demi ; dans un tel cas, on dira que la combinaison est parfaitement compatible.

On a trouvé que les paramètres les plus importants qui contrôlent la rhéologie des ciments et des superplstifiants sont les suivants :

- Le rapport eau/liant auquel l'essai est effectué ; il faut cependant qu'il soit aussi voisin que possible de celui qui sera utilisé pour fabriquer le BHP ;
- La température initiale de l'eau utilisée pour fabriquer le coulis ;
- La finesse du ciment ;
- La composition physique du ciment ;
- La quantité de sulfates alcalins dans le ciment;
- L'efficacité malaxage.

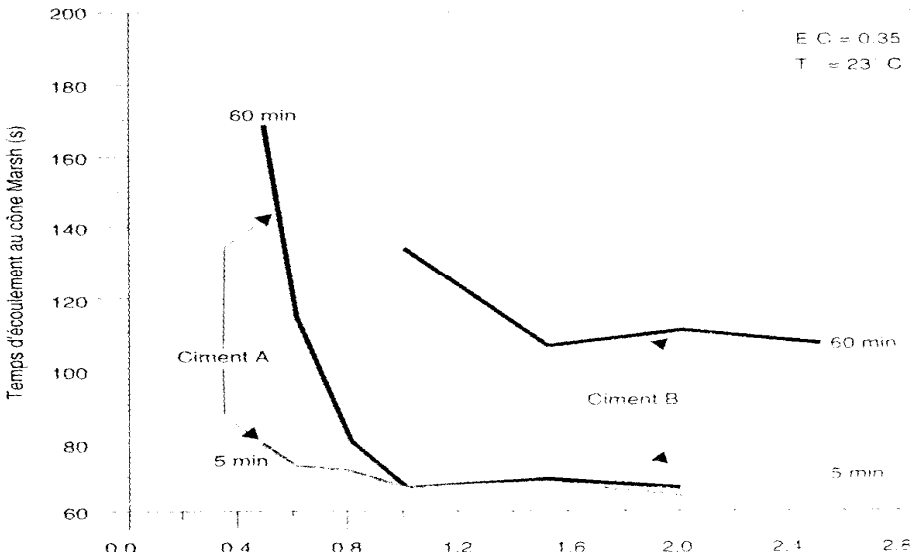


Figure III.9 : Temps d'écoulement au cône Marsh pour deux ciments différents.

En pratique, on peut se retrouver face à quatre situations lorsque l'on étudie les propriétés rhéologiques de coulis ayant un faible rapport eau/liant en utilisant la méthode du cône de Marsh **[02].**

III.4.3.2 Détermination de l'effet maximal absolu d'un adjuvant dispersant

La (FigureIII.10 a) représente le cas d'une combinaison compatible ; la dosage en Superplastifiant au point de saturation est faible (de l'ordre de 1% au maximum) et le temps d'écoulement à 60 minutes est très voisin de celui à 5 minutes. Ainsi, le même temps d'écoulement est maintenu pendant 1 heure.

La (FigureIII.10 b) présente un cas flagrant d'incompatibilité : le dosage en Superplastifiant au point de saturation est plus ou mois bien défini, il est très élevé et la courbe d'écoulement à 60 minutes est située très au-dessus de celle à 5 minutes.

Quelquefois, dans les cas d'incompatibilité encore plus prononcés, le coulis ne s'écoule même plus quelque minutes après sa fabrication et ce parfois aussi tôt que 15 minutes après le début du malaxage.

Les (Figures III.10 c et III.10 d) présentent des cas intermédiaires. Dans la (Figure III.10 **c**) l'écoulement à 5 minutes est semblable à celui de l'écoulement à 5 minutes à la (Figure III.10a), mais l'écoulement à 60 minutes est semblable à celui à 60 minutes de la (Figure III.10 b). À la (Figure III.10 d), l'écoulement à 5 minutes est semblable à celui à 5 minutes de la (Figure III.10b) et l'écoulement à 60 minutes a une position relativement semblable à celui à 5 minutes que l'on avait dans le cas de la (Figure III.10a).

Figure III.10 : Différents types comportement rhéologique pour un coulis de rapport E/C de 0.35 Testé à 22 ^{0}C

À l'heure actuelle, il est impossible de développer des poly-naphtalènes et des poly-mélamines qui puissant fluidifiant n'importe quel type de ciment pour n'importe quel rapport eau/ciment parce que les ciments présentent des réactivités beaucoup trop différentes et qu'il y a beaucoup de variabilité dans la vitesse de solubilisation des différents sulfates de calcium et différents sulfates alcalins que l'on retrouve dans un ciment commercial.

III.4.3.3 Influence de la séquence d'introduction du Superplastifiant

Comme dans le cas des réducteurs d'eau et même de façon encore plus nette, on observe qu'en général lorsqu'on a le loisir de le faire, on a tout intérêt à rajouter le Superplastifiant plus tard possible lors du malaxage. On laisse ainsi le temps au sulfate de calcium pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment Portland avant le Superplastifiant ne soit introduit. Les molécules de Superplastifiant n'entrent donc pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le C_3A **;** elle demeurent disponibles pour disperser les particules de ciment et augmenter ainsi les effets du Superplastifiant sur la consistance du béton.

Il n'est pas toujours possible de retarder l'introduction de toute la quantité de Superplastifiant qui est nécessaire pour en obtenir un béton ayant un affaissement désiré ; c'est notamment le cas des bétons à hautes performances, où si l'on ne gâchait le béton qu'avec la quantité d'eau nécessaire à l'obtention du faible rapport E/C, on obtiendrait un béton très sec sur lequel d'ailleurs le Superplastifiant, introduit par la suit, n'aurait qu'assez

peu d'effet. On préfère alors pratiquer ce que l'on appelle une double introduction, c'est-à-dire que, dans un premier temps, on incorpore immédiatement dans le béton juste assez de Superplastifiant pour que l'on puisse obtenir un béton plastique, 50 à 100mm d'affaissement, que l'on peut malaxer convenablement et l'on retarde l'introduction du reste du Superplastifiant, en un deuxième temps, vers la fin de période de malaxage ou, mieux encore, à la livraison (Figure III.11**)**.

Une autre possibilité, pratiquée à l'université de Sherbrooke, consiste à incorporer dans le béton une faible quantité de retardateur (gluconate de sodium) au moment de son malaxage avec toute la quantité de Superplastifiant nécessaire. En effet, ces molécules (courtes) de retardateur agissent plus vite sur le C_3A que les molécules (plus grosses) de Superplastifiant, réagissant avec le C_3A **[13].**

.

Pâte de ciment portland sans fluidifiant. Pâte de ciment portland avec fluidifiant.

C : grain de ciment
W : eau

P : pore

Figure III.11 : Défloculation des grains de ciment par l'utilisation d'un fluidifiant [**31]**.

III.4.4 La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke

La méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné ; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1**.** La quantité d'eau contenue dans le Superplastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau du gâchage. La procédure de formulation commence par le choix de quatre caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

1- Le rapport eau/liant ;
2- Le dosage en eau ;
3- Le dosage en Superplastifiant ;
4- Le dosage en additions minérales (fines).

Cette étape concernant la formulation des coulis, à partir de base de la formulation des BHP.

III.4.4.1 Rapport eau/liant

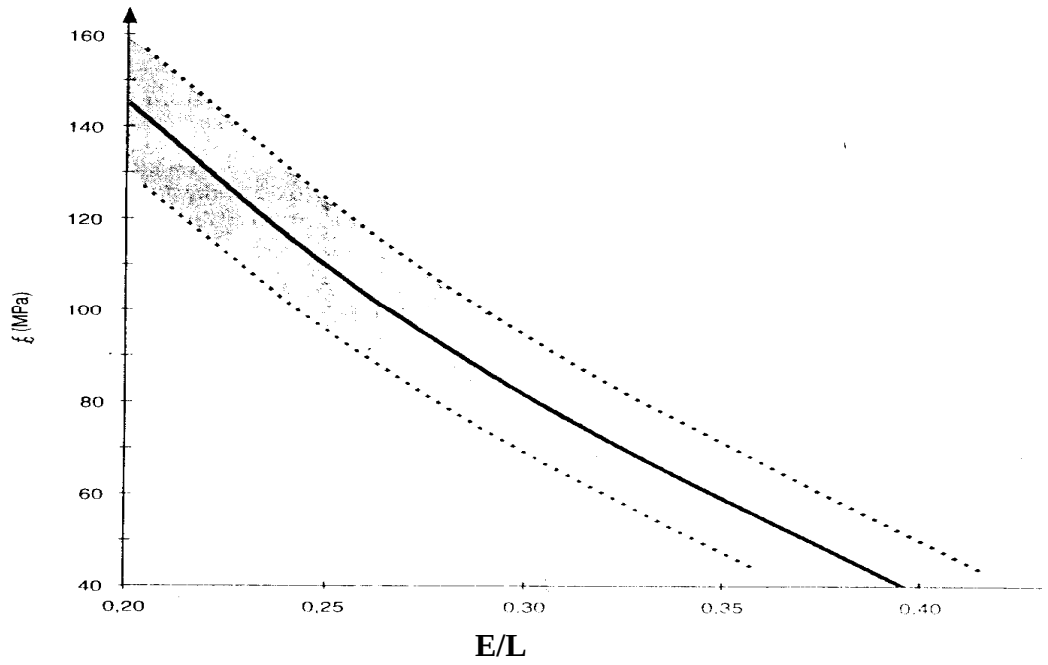


Figure III.12 : Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression

On peut trouver le rapport eau/liant à partir de (Figure III.12) pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la (Figure III.12**)** donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée.

Dans ce cas nous avons fixée le rapport eau/liant est égale 0.30.

III.4.4.2 Dosage en eau

On peut concevoir un BHP de 200mm d'affaissement en utilisant un faible dosage en eau et un fort dosage en Superplastifiant ou, inversement, un dosage en eau plus élevé et un dosage en Superplastifiant plus faible. Du point de vue économique, il n'y a pas tellement de différence entre ces deux options, mais, du point de vue rhéologique, la différence peut être très significative selon la réactivité rhéologique du ciment et l'efficacité du Superplastifiant.

En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs :

- La quantité initiale d'eau ;
- La réactivité du ciment ;
- La quantité de Superplastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

Ainsi, la quantité minimale d'eau de gâchage qui permet de fabriquer un béton de 200mm d'affaissement peut varier sensiblement selon :

- La finesse,
- La composition physique,
- La réactivité des phases ; et
- Selon la composition et la solubilité des sulfates de calcium et des sulfates alcalins du ciment.

Alors il est obligatoire d'utiliser une assez grande quantité de Superplastifiant pour obtenir un affaissement élevé. La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de Superplastifiant est d'utiliser un plan d'expérience. Toute fois, comme cette méthode n'est pas toujours pratique, la figure III.13 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation.

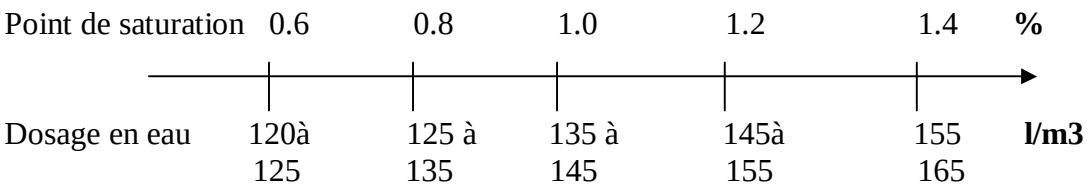


Figure III.13: Détermination du dosage en eau.

III.4.4.3 Dosage en Super plastifiant

Le dosage en Superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en Superplastifiant égal 1%**.**

III.4.4.4 Procédure expérimentale

Tous les bétons étudiés sont des bétons à hautes performances fluidifiés à la dose de saturation. La dose de saturation a été déterminée par la méthode des coulis. L'eau totale introduite dans les mélange, y comprise l'eau contenue dans le Superplastifiant est égal *135l/m*^{3}, et le rapport eau/liant étudier sont *0.30*. Les pourcentages des additions fines introduits dans les mélanges sont, l'ajout des additions fines est réalisé par substitution d'une partie du ciment par le même poids des additions fines, et dosage en liant (ciment + additions fines) ont été retenus : *450Kg/m*^{3}

A) Première mélange

Dans ce cas nous avons étudié les coulis fluidifiant sans additions fines :

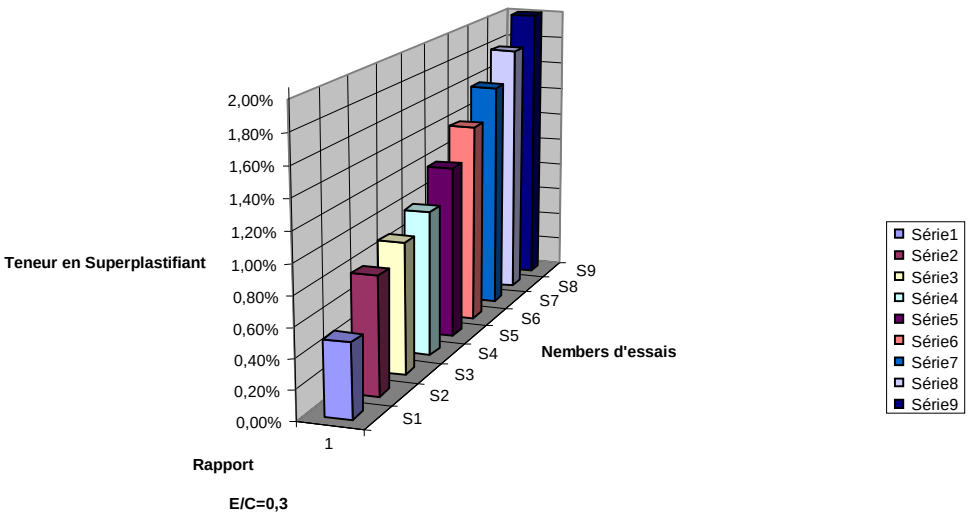


Figure III.14- Rapport E/C en fonction de teneurs en superplastifiant avec dosage de ciment **450Kg/m3.**

Tableau III.1- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant sans additions fines.

E/L	*C (g)*	*E (g)*	*SP %*	*Temps d'écoulement(s)*
0.30	2250	663.75	0.5%	**27.08**
	2250	667,2	0.8%	**25.32**
	2250	662.85	0.9%	**24.29**
	2250	661.5	1%	**36.78**
	2250	660.25	1.1%	**24.34**
	2250	659	1.2%	**23.59**
	2250	656.1	1.4%	**22.56**
	2250	653.4	1.6%	**21.61**
	2250	650.7	1.8%	**21.32**
	2250	648	2.0%	**56.28**

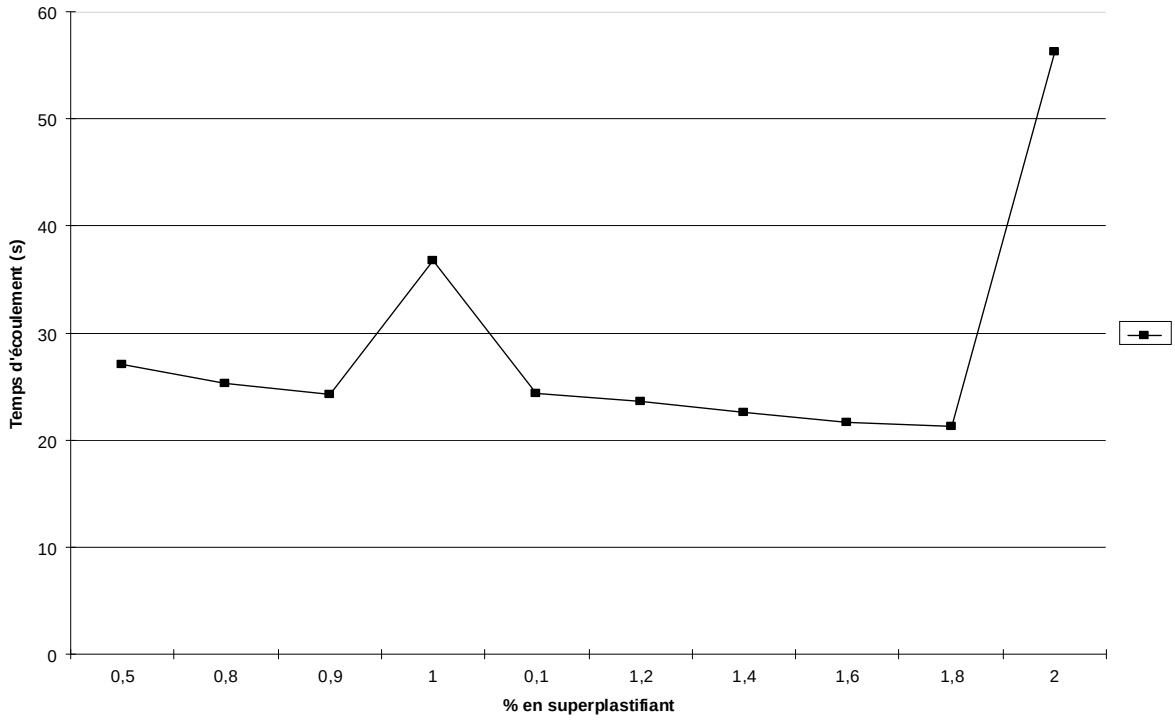


Figure III.15- Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants sans additions fines.

Chaque coulis perd toute sa fluidité après 60 minutes. Le dosage de saturation est de 1.8% de poids du ciment, c'est-à-dire un ciment possédant un bon comportement rhéologique initial le temps d'écoulement à 5 minutes est d'ordre 21.32 secondes.

B) Deuxième mélange

Nous avons étudié les coulis fluidifiant avec leur teneur en additions fins laitiers et filler de calcaire par rapport à la masse du ciment.

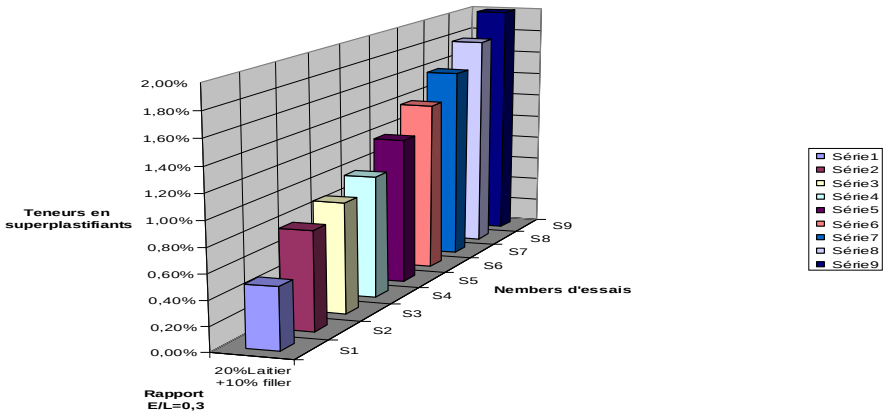


Figure III.16- Rapport E/L avec 20% de laitier et 10% de filler en fonction de teneurs en superplastifiants.

Tableau III.2- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines laitier et filler de calcaire.

E/L	*C (g)*	*E (g)*	*SP %*	*Laitier20%*	*Filler10%*	*Temps d'écoulement(s)*
0.3	1575	668.25	0.5%	450	225	**27.03**
	1575	667	0.6%	450	225	**27.77**
	1575	665.55	0.7%	450	225	**28.03**
	1575	664.2	0.8%	450	225	**28.33**
	1575	662.85	0.9%	450	225	**43.15**
	1575	661.5	1 %	450	225	**25.30**
	1575	659.8	1.2 %	450	225	**24.76**
	1575	656.6	1.4 %	450	225	**23.31**
	1575	653.4	1.6%	450	225	**22.44**
	1575	650.7	1.8%	450	225	**21.78**
	1575	648	2.0%	450	225	**22.62**

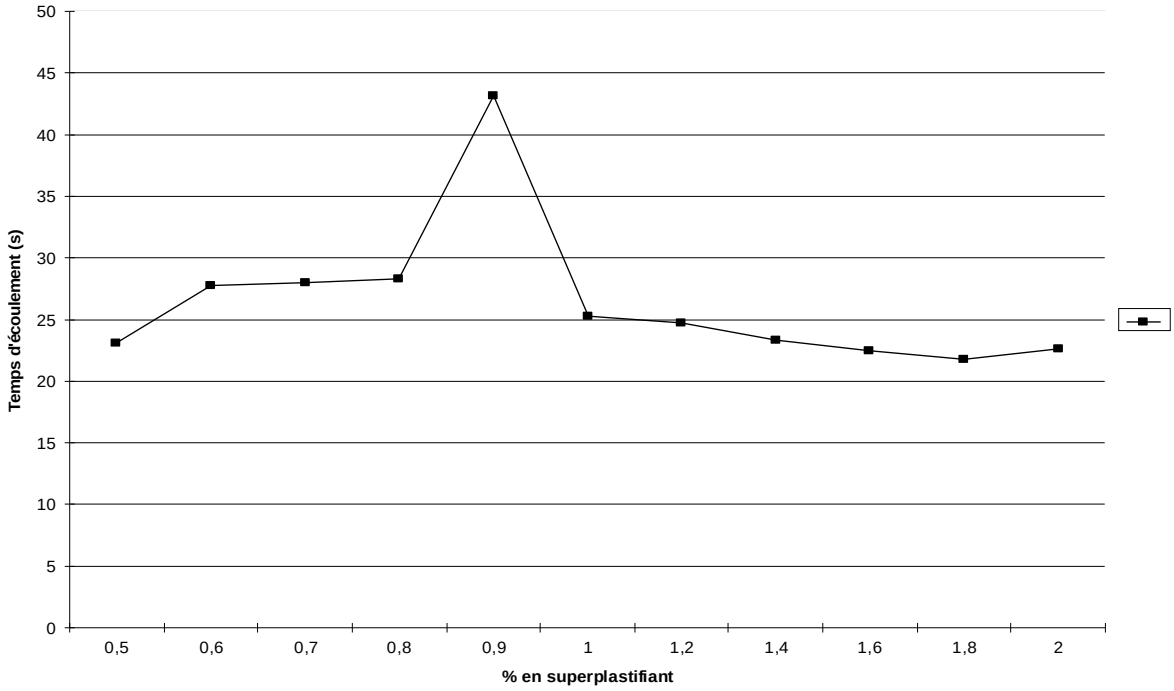


Figure III.17- Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (20% de laitier et 10% de filler).

Dans ce mélange, le point de saturation est de 1.8%, le temps d'écoulement à 5 minutes de l'ordre 21.78 second, dans ce cas on peut dire que le couple est compatible.

C) Troisième mélange

Dans cette mélange nous avons étudié les coulis fluidifiants avec leur teneur en additions fines laitier et Fumée de silice.

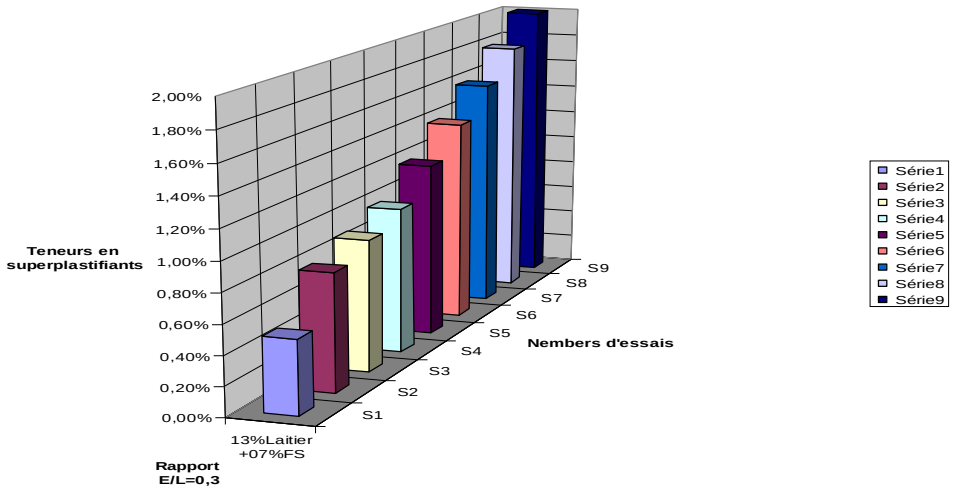


Figure III.18- Rapport E/L avec 13% de laitier et 07% de Fumée de silice en fonction de teneurs en superplastifiants.

Tableau III.3- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines laitier et Fumée de silice.

E/L	*C (g)*	*E (g)*	*SP %*	*Laitier13%*	*F.S 07%*	*Temps d'écoulement(s)*
0.30	1800	668.25	0.5%	292.5	157.5	**02.24.07**
	1800	664.2	0.8%	292.5	157.5	**37.23**
	1800	662.85	0.9%	292.5	157.5	**34.25**
	1800	661.5	1.0%	292.5	157.5	**35.56**
	1800	658.8	1.2%	292.5	157.5	**36.58**
	1800	651.1	1.4%	292.5	157.5	**40.35**
	1800	653.4	1.6%	292.5	157.5	**34.20**
	1800	650.7	1.8%	292.5	157.5	**31.82**
	1800	648	2.0%	292.5	157.5	**32.05**

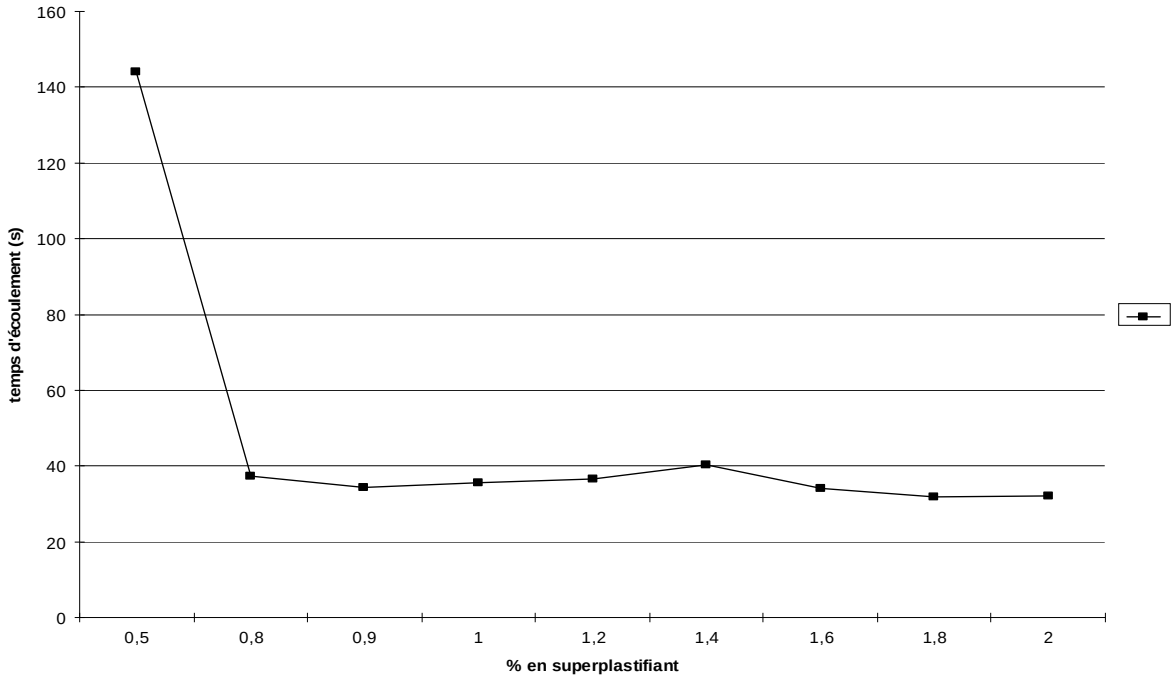


Figure III.19 : Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (13% de laitier et 07% de Fumée de silice).

Dans ce cas, le pâte liant possédant un bon comportement rhéologique initial (le temps d'écoulement à 5 minute de l'ordre 31.82 Seconde), mais qui se dégrade de 60 minutes (de l'ordre 124.07. le dosage de saturation en superplastifiant en se pâte de liant est de 1.8 %.

D) Quatrième mélange

Dans ce mélange nous nous intéressons à étudier le coulis fluidifiant avec teneur en addition fine pouzzolane par rapport à la masse du ciment.

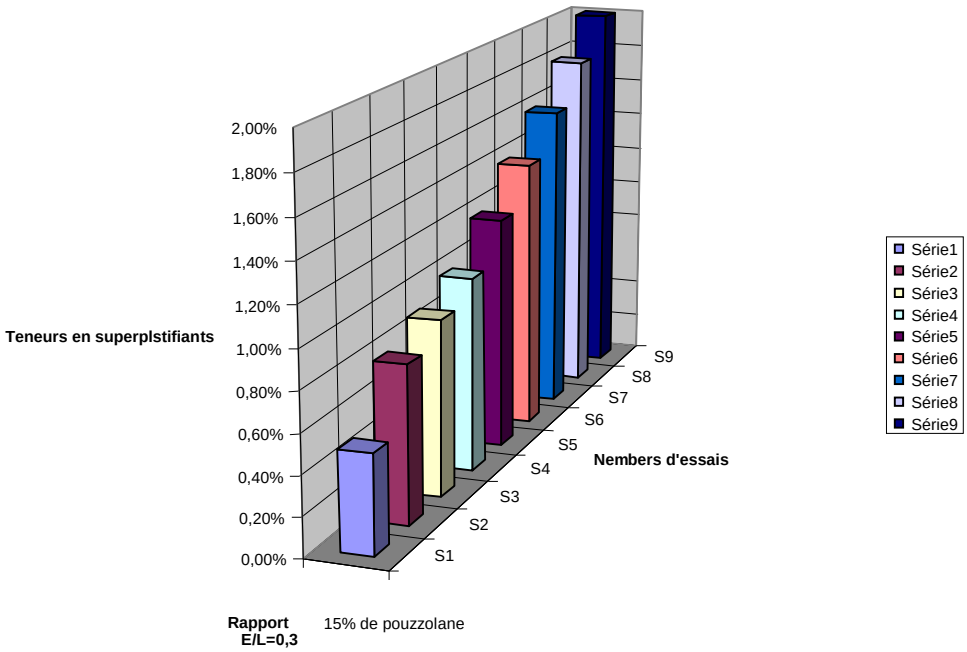


Figure III.20- Rapport **E/L** avec 15% de pouzzolane en fonction de teneurs en superplastifiants.

Tableau III.4- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec additions fines pouzzolanes.

E/L	*C (g)*	*E (g)*	*SP %*	*Pouzzolane15%*	*Temps d'écoulement(s)*
0.30	1912.5	668.25	0.5%	337.5	**49.42**
	1912.5	667	0.6%	337.5	**40.87**
	1912.5	664.2	0.8%	337.5	**37.54**
	1912.5	661.5	1.0%	337.5	**36.58**
	1912.5	658.8	1.2%	337.5	**44.98**
	1912.5	651.1	1.4%	337.5	**43.70**
	1912.5	653.4	1.6%	337.5	**43.92**
	1912.5	650.7	1.8%	337.5	**42.44**
	1912.5	648	2.0%	337.5	**01.38.34**

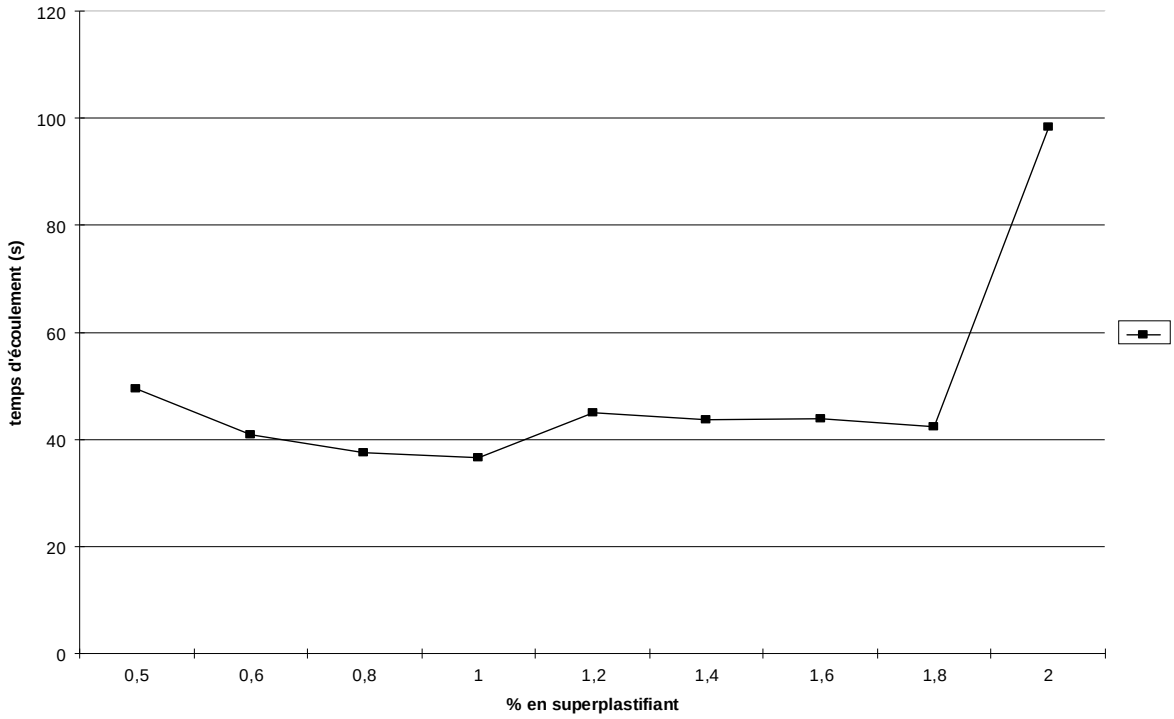


Figure III.21 : Temps d'écoulement en fonction de teneurs en superplastifiants et avec additions fines (15% de pouzzolane).

Le dosage de saturation obtenu est de 1% de poids du ciment, le dosage en superplastifiant supérieur à 1.8%, nous enregistrons très peu de différence au niveau de la fluidité à 5et 60 minutes. Dans ce cas on peut dire que le couple est compatible.

e) Cinquième mélange :

Le cinquième mélange étude le coulis de la pâte pure, dans ce mélange le temps d'écoulement est supérieur à $1^{h}.30$, la pâte de coulis reste figée dans le cône, c'est-à-dire la pâte de coulis entre à l'état durci.

III.5. Conclusion :

En se basant sur l'approche au Cône de Marsh, nous avons étudié l'influence du rapport Eau/liant, du type et du dosage en additions minérale ainsi que celui de l'adjuvant sur la fluidité des pâtes de ciments. Les résultats obtenus vont dans le sens de la mise au point des coulis et leur formulation pour leurs utilisations comme matériau indépendant, ou` pour les introduire dans une composition de béton en tant que phase suspendant.

Parmi les essais développés pour la caractérisation des fluidités des coulis, l'utilisation de l'essai au Cône de Marsh. L'essai au Cône de Marsh a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec Superplastifiant Pour la recommandation de L'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances.

Le point de saturation est défini par le dosage de Superplastifiant en extrait sec au-dessus duquel le temps d'écoulement ne décroît plus d'une manière appréciable. Le fait qu'une combinaison Ciment- Superplastifiant ne présente pas un point de saturation bien identifiable peut indiquer une incompatibilité.

Les paramètres les plus importants qui contrôlent la rhéologie des ciments et des superplastifiants sont les suivants :

- Le rapport eau/liant auquel l'essai est effectué ; il faut cependant qu'il soit aussi voisin que possible de celui qui sera utilisé pour fabriquer le BHP ;
- La température initiale de l'eau utilisée pour fabriquer le coulis ;
- La finesse du ciment ;
- La composition physique et chimique du ciment ;
- L'efficacité du malaxage.

En outre, la combinaison des superplastifiants et des ajouts cimentaires permet aussi de favoriser une meilleure utilisation et une utilisation en plus grande quantité d'additions minérales hydrauliques ou pouzzolaniques en diminuant la quantité de **C-H-S** nécessaire pour développer les premiers liens qui donnent la résistance au jeune age du béton.

L'utilisation combinée de deux ajouts cimentaires, du laitier et de la fumée de silice ou laitier et filler de calcaire, est aussi très bénéfique parce que qu'une faible quantité de fumée de silice permet de compenser la plus faible réactivité du laitier ou de la pouzzolane ou et filler calcaire.

CHAPITRE IV

COMPSITION DU BETON A HAUTES PERFORMANCES

IV.1. Introduction

Né avec le XX^{e} siècle, le béton, matériau jeune, a connu ces vingt dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau, (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovantes tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation.

Le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des qualités intrinsèques: durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustiques, diversité des formes, des couleurs et des aspects.

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis.

Dans ce chapitre nous abordons les différents essais effectués sur les matériaux utilisés pour la formulation du béton à hautes performances et du béton ordinaire témoin ; ainsi que les essais réalisés sur le béton confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état frais et durci.

IV.2. Les bétons à Hautes Performances (BHP)

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par:

– une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50MPa sur cylindre;

– un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs **[32]**.

Un béton résulte d'un mélange de granulats, de ciment, d'eau, d'additions minérales, et d'adjuvants. Le rôle joué par l'eau est double:

– chimiquement et fondamentalement, assurer l'hydratation du ciment, et donc le durcissement de la pâte cimentaire intergranulaire;

– physiquement et pratiquement, contribuer de façon déterminante à l'ouvrabilité du béton frais en lui conférant une rhéologie convenable, une fluidité suffisante permettant sa mise en œuvre par «coulage».

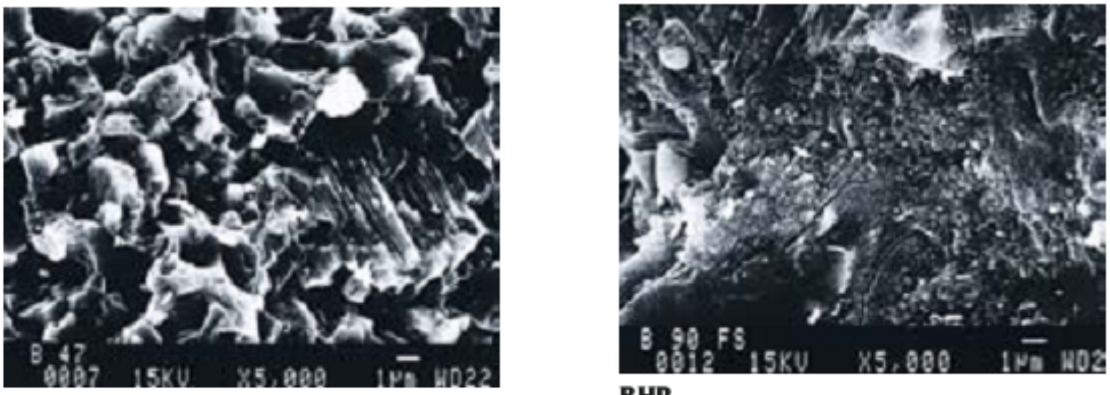


Figure IV-1- Le BHP présente, à l'échelle microscopique, une structure plus fermée qu'un béton courant (grossissement x 5000).

IV.2.1. Fluidité

Obtenue avec pourtant un moindre dosage en eau, c'est la conséquence de la défloculation des grains de ciment et, lorsqu'on y a recours, de la présence d'ultrafines jouant aussi un rôle de lubrifiant entre éléments de plus grande taille.

IV.2.2. Résistance mécanique élevée au jeune âge

La finesse de mouture du ciment, définie par sa surface spécifique (surface Blaine), caractéristique contrôlée lors de la production du ciment, influe sur sa vitesse d'hydratation et sur son évolution à long terme. Les classes de résistance des ciments (42,5 ou 52,5) utilisées pour la formulation d'un BHP résultent en général d'une mouture fine du clinker. Par ailleurs l'addition d'ultrafines telles que des fumées de silice ou de certaines fines influe également sur les vitesses d'hydratation.

IV.2.3. Diminution de la porosité de la matrice cimentaire

Pour un rapport E/C inférieur à 0,4, correspondant au domaine des BHP, la résistance prévisible dépasse alors 50MPa. Cependant, le mélange devient dans la pratique plus difficile à réaliser car il n'y a plus assez d'eau pour assurer la fluidité; une quantité importante d'air est alors piégée lors du malaxage, ce qui crée de nouveau de la porosité et fait chuter la résistance: il faut fluidifier ce mélange pour ne pas entraîner d'air. La solution consiste à défloculer le ciment (Figure IV.2).

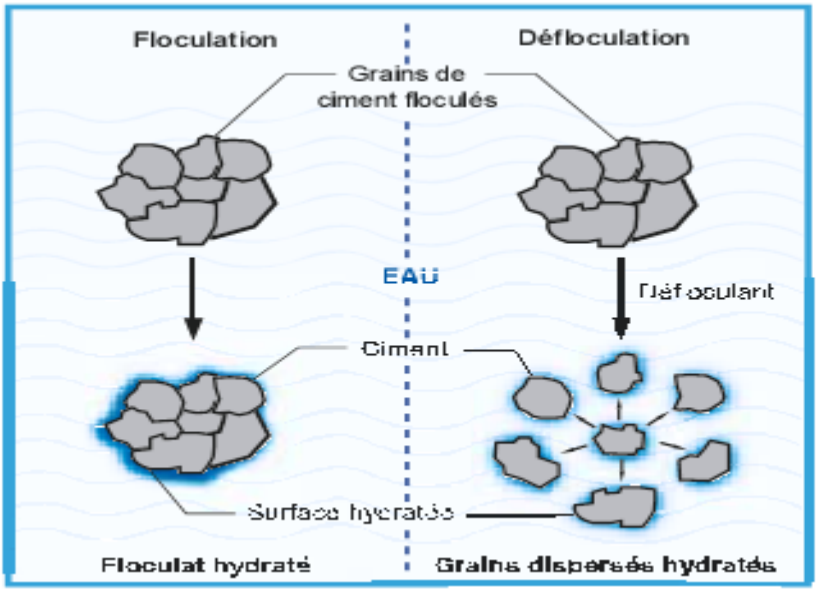


Figure IV-2- Principe de défloculation**.**

Au milieu d'un floc, les grains sont solidaires les uns des autres, se déplacent ensemble, en piégeant une certaine quantité d'eau, et occupent un volume apparent plus important: deux causes limitant la possibilité pratique de réduction de la teneur en eau et de la porosité.

Quand il y a eu défloculation, les grains de ciment se déplacent individuellement les uns par rapport aux autres et vont pouvoir s'organiser pour créer un bon empilement, libérant ainsi les poches d'eau du système floculé. Il s'ensuit une diminution de la viscosité et une réduction du dosage en eau requis pour obtenir une bonne ouvrabilité (Figure IV.3).

Les produits qui permettent de défloculer sont des adjuvants connus sous le nom de superplastifiants. En fluidifiant et réduisant la quantité d'eau, il est alors possible d'aboutir à une pâte de ciment fluide offrant une grande résistance mécanique (Figure IV.4).

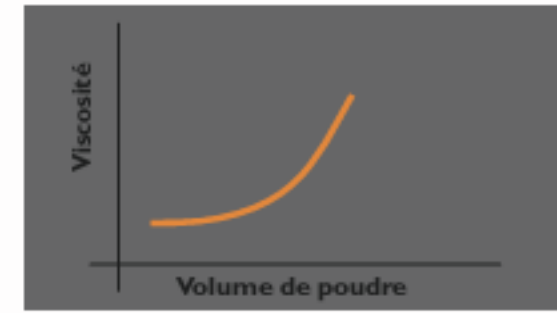


Figure IV-3- Viscosité en fonction du volume de la poudre **[33].**

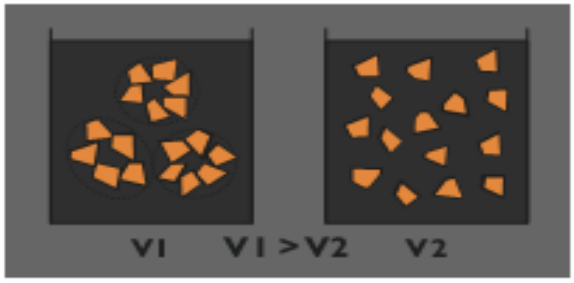


Figure IV-4- La floculation augmente le volume apparent des particules fines, défloculation obtenue par les superplastifiants **[33].**

IV.2.4. Optimisation de l'empilement granulaire

L'optimisation de l'empilement granulaire permet une amélioration de l'ordre de 20% de la résistance par le seul ajustement de la courbe granulométrique. Pour chaque classe granulaire, il existe des mélanges optimums des grains qui permettent d'obtenir la porosité minimum du système. La recherche de l'optimum peut s'effectuer théoriquement, par des modèles plus ou moins sophistiqués, ou expérimentalement.

Ce concept de compacité des mélanges granulaires, utilisé depuis longtemps pour toutes les catégories de granulats, s'applique également aux ultrafines. Comme le sable entre les gravillons, les ultrafines peuvent jouer le rôle de petits éléments entre les grains de ciment, conduisant ainsi à nouveau, selon le même processus déjà évoqué précédemment, à une possible diminution de l'eau dans le mélange tout en préservant les propriétés de mise en œuvre. La plus utilisée des ultrafines est la fumée de silice [**34**].

IV.2.5. Le matériau aux multiples performances

Ces performances sont présentes à tous les stades du cycle de vie du béton.

a) À l'état frais

– sa fluidité facilitant la mise en œuvre, aussi bien sur chantier qu'en usine de préfabrication;

– sa bonne stabilité, garantissant l'absence de ségrégation;

– sa faible viscosité autorisant le pompage sur de longues distances;

- sa résistance élevée au jeune âge favorisant l'optimisation des cycles de décoffrage, de désétaiement, de mise en œuvre de la précontrainte éventuelle, de manutention et de transport d'éléments préfabriqués;

b) A l'état durci

– sa résistance importante en compression permettant, à conception identique, de diminuer l'encombrement des éléments de structure ou, à sections identiques, d'en accroître les capacités portantes (charges, portées);

– son module d'élasticité plus élevé réduisant la déformabilité des structures (augmentation de la raideur), en particulier les flèches, et améliorant la stabilité aérodynamique des ouvrages;
– son fluage à la fois plus faible et plus bref, simplifiant l'élaboration des interfaces avec le second œuvre et permettant la diminution des valeurs de tension initiale de la précontrainte éventuelle;
- sa faible porosité, d'où sa résistance accrue aux actions dues à l'environnement (pluie, eau de mer, eaux sulfatées, chlorures, gel, etc.) et donc sa durabilité.

IV.2.6. Rapport eau/ciment

Le rapport E/C exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement sur l'espacement initial entre les grains de ciment en suspention dans l'eau de gâchage. Plus le rapport eau/ciment est faible, plus, les grains de ciment sont approchés les une des autres. Les espaces à remplir entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

Pratiquement la quantité d'eau nécessaire dans un mélange normale est toujours très supérieure à celle qui est nécessaire pour l'hydratation du ciment pour qu'il touche à sa forme finale dans le béton. Une grande partie de l'eau supplémentaire nécessaire dans le mélange pour rendre malléables se sera évaporée lorsque le béton atteindra sa forme finale. La densité finale de la pâte de ciment une fois durci, et par conséquentes quelques autres propriétés importantes comme la résistance et la porosité, sont déterminées par le rapport eau/ciment du mélange originale. A partir d'un seuil de mouillage, plus le rapport eau/ciment est faible plus la résistance de la pâte durci, c'est-à-dire du béton, est élevée [**35**].

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, du dosage en ciment, d'eau, ainsi que d'adjuvants de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les matières premières utilisées sont d'origine locale et étrangère, et qui sont respectivement :

1. Des granulats concassés provenant de la carrière *ENG*, l'unité Tayab Bouzitouna El-Khroub, exploite un gisement de calcaire massif. Leurs dimensions sont $G_1 = 4/8$; $G_2 = 8/16$.
2. Le sable *0/4* de la carrière *ENG*, l'unité Tayab Bouzitouna.
3. Un ciment de Classe *CPJ/CEMII/42.5* fabriqué à l'usine de EL-Hamma (région de

Constantine) conformes à la norme *NF P 15-301*.

4. Une fumée de silice fabriquée par la société canadienne *SKW* ;

5. Filler de calcaire l'unité Tayabe Bouzitouna El-Khroube;

6- Pouzzolane naturelle du gisement Bouhammidi de *Beni çaf (Algérie) ;*

6. Un adjuvant superplastifiant *MEDAFLOW 30* (Granitex-NP).

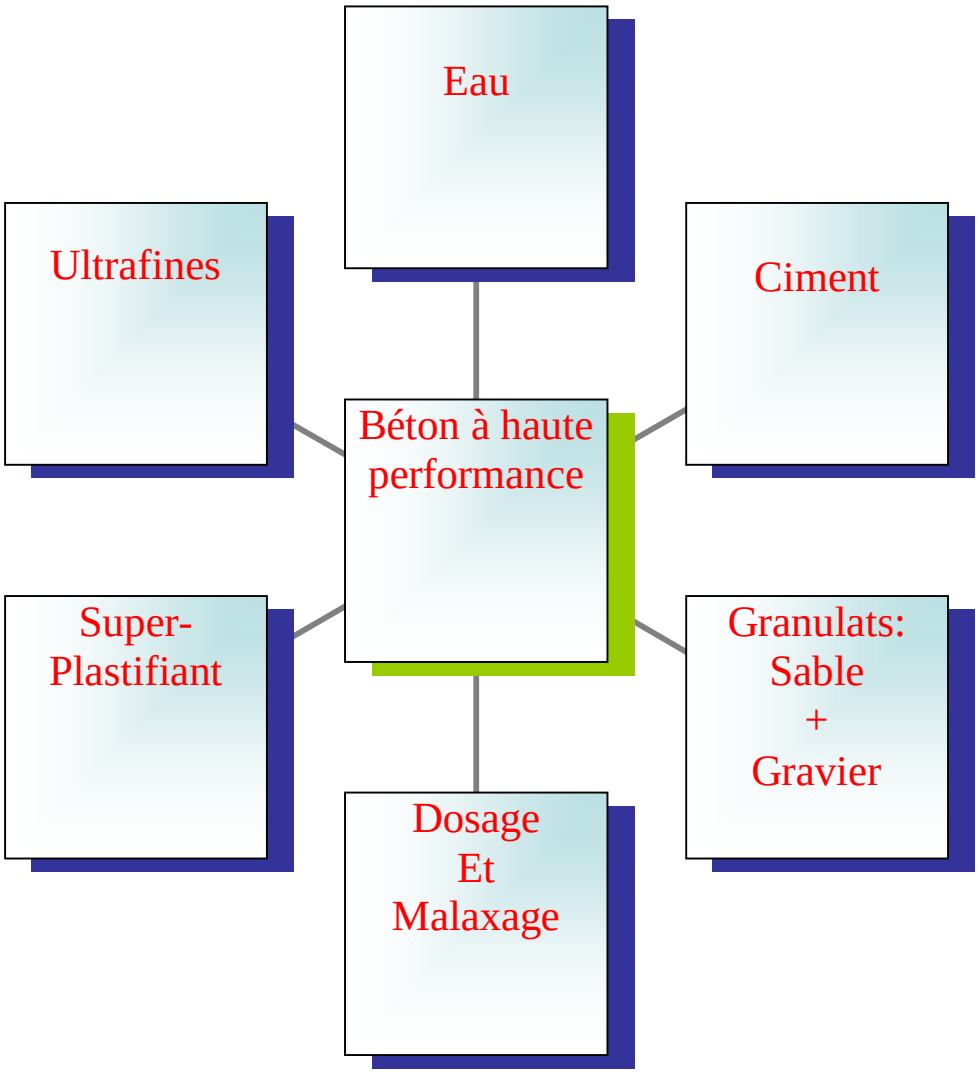


Figure IV.5 : Un organigramme pour l'obtention d'un BHP.

IV.3. Méthodes d'essais adoptés

IV.3.1 Essais sur béton frais

IV.3.1.1 Mesure de l'affaissement (NF P 18-415)

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test), qui est l'essai le plus utilisé à cause de sa facilité et sa reproductivité sur chantier. Cet essai est utilisé pour contrôler le pourcentage d'eau dans le béton confectionné. Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement. On prend la moyenne de trois essais successifs

IV.3.1.2 Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

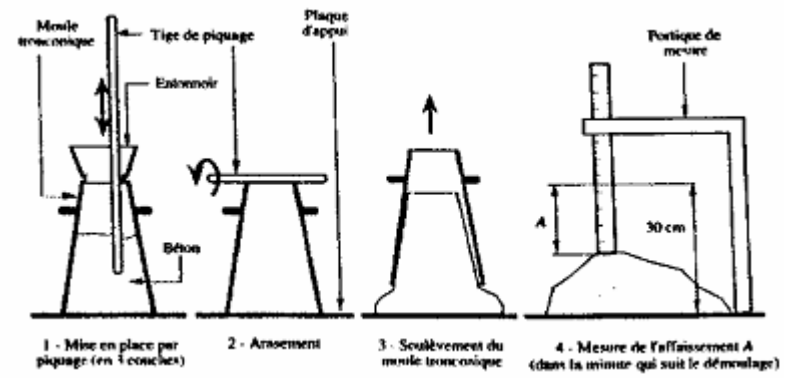


Figure IV.6 : Mesure l'affaissement au cône d'abrams [**36].**

IV.3.1.3 Les classes de consistance

Les différentes classes de l'affaissement au cône d'Abrams en cm :

Tableau IV.1 : Les différentes classes de consistance [**39**].

Classe de consistance des bétons – norme NF EN 206-1	
Consistance des bétons	*Affaissement (en mm) au cône d'Abrams*
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	≥ 220

IV.3.1.4 Masse volumique à l'état frais

Cet essai consiste à :

- Remplir un récipient de volume V (litre) et de masse M (kg) d'un échantillon de béton frais en deux couches tassées par vibration de 30 secondes par couche ;
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle ;
- Peser le récipient, soit de masse M_T en kg.

La masse volumique du béton frais sera alors :

$$\mathbf{M_{vbf} = M_T - M/V\ (Kg/l)} \qquad \text{IV.1.}$$

IV.3.2 Essais mécaniques

Pour chaque type et âge d'essai, les éprouvettes sont testées au nombre de trois.

IV.3.2 .1 Essai de compression (NF P 18-406)

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de différentes dimensions ou sur des cubes. Pour nos essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cylindriques *(16 × 32) cm*. L'éprouvette, après avoir subit un surfaçage à base de soufre pour assurer la planéité des deux extrémités de l'éprouvette et une perpendicularité suffisante à son axe, est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. à l'aide d'une presse de capacité de *3500 KN*.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{\sigma c = p/s} \qquad \text{IV.2.}$$

Avec :

σc : Contrainte de rupture (MPa) ;

P : Charge de rupture (MN);

S : Section de l'éprouvette (2×10^{-2} m^2).

IV.3.3 Les étapes de la formulation

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes:

- Détermination d'une formule théorique prévisionnelle:

1- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale;

2- Détermination des proportions des constituants;

3- Optimisation du squelette granulaire.

- Optimisation du mélange en laboratoire:

1- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant;

2- Ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation;

3- Vérification du comportement rhéologique du béton frais;

4-Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants;

5-Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

IV.3.3.1 L'optimisation de la formulation d'un BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

- Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau :

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30%). Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie d'eau n'est plus piégée dans les flocs de ciment tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

- Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire :

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimums de grains permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire.

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micro vides inter granulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment- granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques **[40].**

IV.3.3 .2 Résistances mécaniques

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de a rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de *60MPa à 28 jours* peut offrir des résistances mécaniques de *15MPa* à 24heures, voire davantage, et *40MPa à 7 jours*. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

Nota :

Les règles BAEL définissent la résistance caractéristique à la traction, à partir de la résistance à la compression, par les formules suivantes [**38]** :

$$f_{tj} = 0{,}6 + 0{,}06\, f_{cj} \quad \text{si } f_{cj} < 60\text{MPa} \qquad \text{IV.3.}$$

$$f_{tj} = 0{,}275\, f_{cj}^{2/3} \quad \text{si } 60 \leq f_{cj} \leq 80\text{MPa} \qquad \text{IV.4.}$$

- Carrasquillo, Nilson et slate (1981) suggère la relation suivante pour des bétons ayant des résistances en compression comprise entre 21 et 83 MPa:

$$f_{tj} = 0.54 f_c^{1/2} \ \textbf{(MPa)} \qquad \text{IV.5.}$$

- Raphael (1984) suggère la relation suivante pour des bétons ayant des résistances en compression inférieure à **57 MPa**:

$$f_{tj} = 0.313 f_c^{1/2} \ \textbf{(MPa)} \qquad \text{IV.6.}$$

- Le comité **ACI 363** sur le béton à haute résistance (1984) suggère la relation suivante pour des bétons ayant des résistances en compression comprise entre 21 et 83 MPa:

$$f_{tj} = 0.59 f_c^{0.55} \ \textbf{(MPa)} \qquad \text{IV.7.}$$

- Ahmed et Shah (1985) suggèrent la relation suivante pour des bétons ayant des résistances en compression inférieure à **84 MPa**:

$$f_{tj} = 0.462\, f_c^{0.55} \ \textbf{(MPa)} \qquad \text{IV.8.}$$

- Burg et Ost (1992) suggère la relation suivante pour des bétons mûris à l'eau ayant des résistances en compression comprise entre 85 et 130 MPa:

$$f_{tj} = 0.61\, f_c^{1/2} \ \textbf{(MPa)} \qquad \text{IV.9.}$$

Il est important de noter qu'aucune formule n'est recommandée par rapport à l'autre. La meilleure façon de connaître la résistance à la traction ou encore le module de rupture de n'importe quel BHP c'est encore de mesurer ces valeurs.

IV.3.3.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Nota :

Les règles BAEL fournissent une expression qui permet d'évaluer la valeur du module **Ei**, en fonction de la résistance à la compression par la formule:

$$E_{ij} = 11000\, f_{cj}^{1/3} \qquad \text{IV.10.}$$

IV. 4. Démarches expérimentales :

IV. 4.1 Optimisation du squelette granulaire (méthode DREUX-GORISSE)

Le squelette granulaire est déterminé en premier lieu d'après la courbe granulaire de référence établie par la méthode **DREUX-GORISSE**, ensuite la composition sera ajustée par une méthode expérimentale en tenant compte des caractéristiques des matériaux utilisés, en visant le meilleur affaissement au cône d'Abrams pour le béton frais et la meilleure résistance en compression au $7^{ème}$ jour d'âge pour le béton durci.

IV.4.2 Courbe granulaire de référence OAB

D'après la courbe granulaire de référence on détermine en premier lieu, le pourcentage en volume absolu de chaque fraction de granulats (tableauIV.2) ; et en second lieu leurs volumes absolus (tableauIV.3) et finalement leurs différentes masses (tableauIV.4).

Tout d'abord, on trace la courbe granulaire optimale OAB définie par les suivants :

O (0,0) ; **B (D max, 100%)** et un point de brisure A dont les coordonnées sont

$$A\begin{cases} X = \dfrac{D_{max}}{2} \\ Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K \end{cases}$$

Avec **K** le terme de correcteur [**37**], dépendant du dosage en ciment, de la nature du sable et son module de finesse, et aussi du mode de serrage.

$$K = -4 + Ks \qquad \text{IV.11.}$$

$$K s = 6Mf - 15 \qquad \text{IV.12.}$$

K s = 6 * 2.86 - 15 = 2, 16

K = -4 + 2,16= -1,84

On aura alors le point A défini par: $A\begin{cases} X = 8mm \\ Y = 48.16\% \end{cases}$

D'après la courbe de référence (cf. figure IV.5) on obtient les pourcentages en volume absolu de chaque classe de granulats.

Tableau IV.2- Pourcentages en volume absolu des granulats**.**

	Sable 0/4	*Gravillon 4/8*	*Gravier 8/16*
Pourcentages en volume absolu (%)	***35.5***	***9.5***	***55***

Pour obtenir le dosage de chaque fraction de granulat en volume, il faudra calculer le volume que occupent ces derniers dans un mètre cube de béton.

D max= 16mm, béton plastique, vibration normale, on adoptera donc un coefficient de compacité γ= 0.9. [**17**]

Les valeurs des constituants solides sont les suivants :

Volume absolu total … $\boldsymbol{V_T = 1000 \times \gamma = 900L}$

Nous fixons le dosage en ciment à 450 kg/m^3 ; (**ρ= 3.1 g/cm^3**).

- Volume absolu du ciment ……Vc= 450/3.1=145L/m^3.
- Volume absolu des granulats **…….**$\boldsymbol{Vg = V_T - V_C}$ = 755L.

Donc le dosage des fractions des granulats en litres est :

Tableau IV.3- Les volumes absolus de chaque granulat.

Classe des granulats	***Sable 0/4***	***Gravier***	
		4/8	***8/16***
volume absolu du granulat (l)	***268***	***72***	***415***

Masses volumiques absolues des granulats :

$\boldsymbol{\rho_{sable} = 2.5\ g/cm^3}$

$\boldsymbol{\rho_{gravier} = 2.47\ g/cm^3}$

Les dosages en granulats sont donc en kg :

Tableau IV.4- Masses des granulats par un mètre cube de béton.

Classe des granulats	***Sable 0/4***	***Gravier***	
		4/8	***8/16***
volume absolu du granulat (Kg)	***670***	***178***	***1025***

Une fois la composition granulaire déterminée, on passe à la formulation finale du béton en prenant en considération les proportions des autres constituants (ciment, fumée de silice, laitier, filler, pouzzolane, adjuvant et eau).

Les données de base sont :

- ✓ Dosage en ciment *450 kg/m^3* ;
- ✓ *E/L=0.30* ⟶ *E=135l/m3* **;**
- ✓ Pour les dosages en additions minérales (voire le chapitre III) avec le point du saturation de superplastifiant de chaque dosage en liant par essais en cône de Marsh,

le dosage en super plastifiant (% en extrait sec) par rapport au poids du ciment nous avons fixée comme suite :

Tableau IV.5- Les différents types de dosage en liant avec le point de saturation.

E/L=0.3	***Dosage de liant***	***Dosage de super-plastifiant***
Ciment	***450Kg/m3***	***1.8%***
Ciment+ laitier et filler	***20% de laitier;*** ***10% de filler.***	***1.8%***
Ciment+ laitier et Fumée de silice	***13% de laitier;*** ***07% de Fumée de silice***	***1.8%***
Ciment+ pouzzolane	***15% de pouzzolane***	***1.0%***
Béton témoin	/	/

IV.4.3 Confection du béton à haute performance

Le béton est confectionné dans un malaxeur à axe vertical, la procédure de malaxage est la suivante :

1) Introduction par ordre les fractions de graviers *4/8 ,8/16* et sable *0/4*, puis le ciment mélangé avec les additions minérales la fraction de sable ;

2) Malaxage à sec des ingrédients pendant *2mn* ;

3) Introduction de la moitié de l'eau de gâchage et malaxage pendant 1mn ;

4) Introduction de la totalité du super plastifiant incorporée dans la deuxième moitié de l'eau de gâchage ;

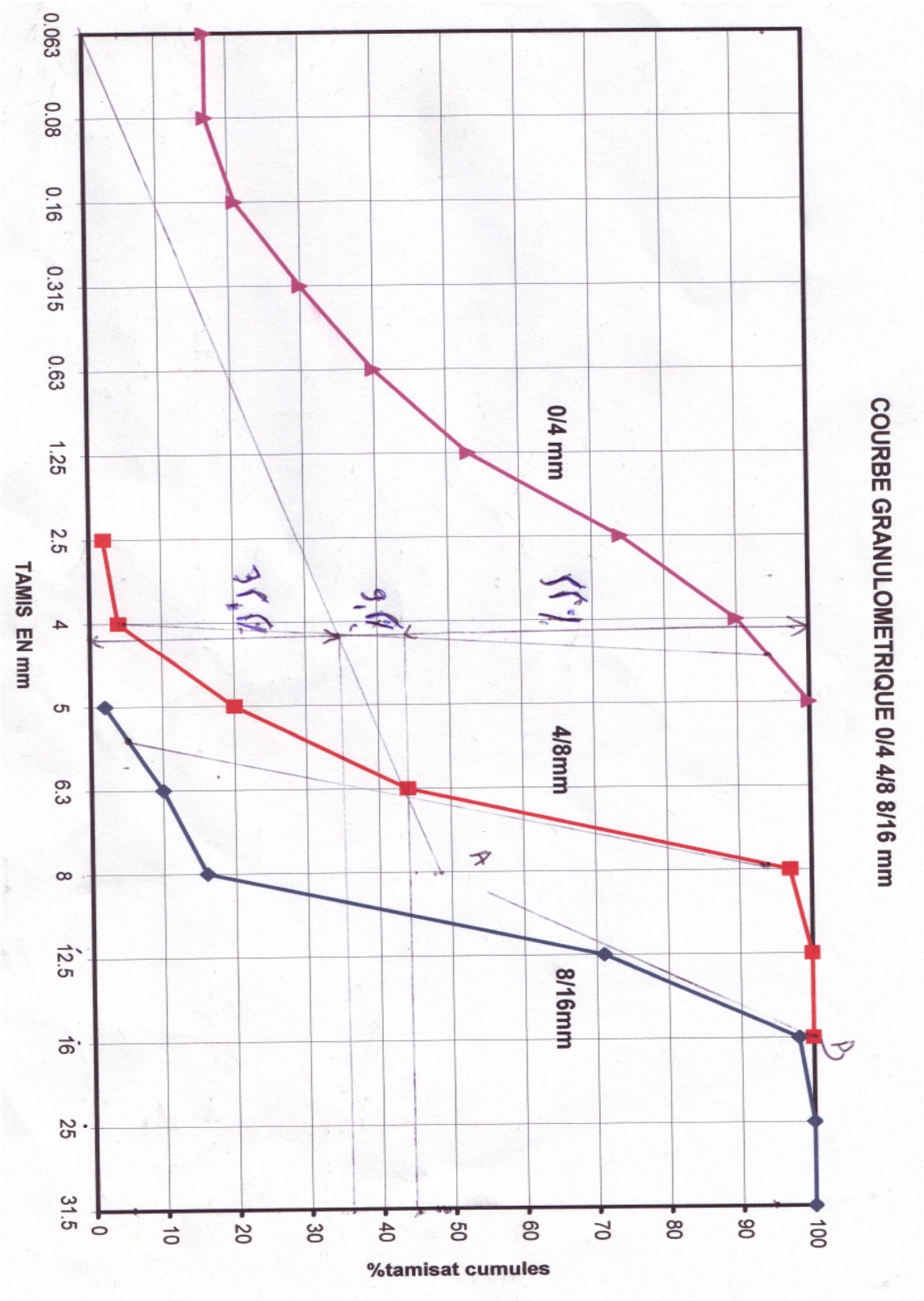
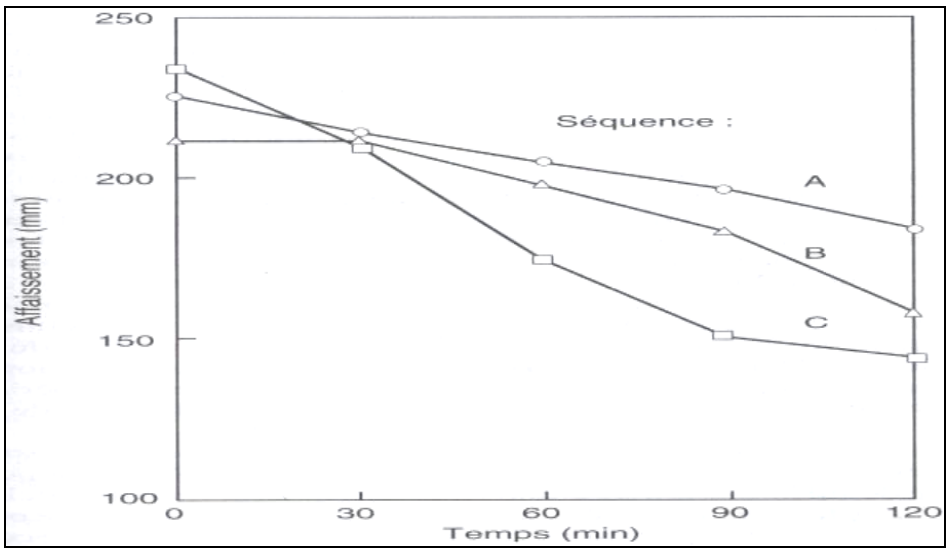


Figure IV.7 - Pourcentages des granulats et courbe de référence.

En raison de l'importance de l'homogénéisation des matériaux, il peut être préférable de ne pas remplir le malaxeur à sa capacité commerciale ; une réduction du tiers, même à la moitié, peut être souhaitable. Le temps de malaxage doit être plus long qu'à l'ordinaire pour assurer l'homogénéité de ce mélange plutôt collant : 90 secondes sont recommandées. La séquence d'introduction des matériaux dans le malaxeur doit être établie après différents essais et elle peut être compliquée. Un exemple de l'effet des séquences d'introduction des matériaux sur l'affaissement de béton dont le rapport eau/ciment était de 0.25 ou 0.30et la durée de malaxage de 225 secondes est représentée à la figure 4.6. Trois opérations ont été utilisées: (A) Introduction de tous les constituants en même temps; (B) le ciment et l'eau sont mélangés avant que les autres constituants ne soient ajoutés, (C) le ciment et les granulats fins sont malaxés avant l'ajout des autres constituants. La méthode A donne l'affaissement le plus faible, mais cette observation ne représente pas une règle générale [**07**].



FigureIV.8- Effet de la séquence d'introduction des matériaux lors du malaxage sur la perte d'affaissement dans le temps (rapporte eau/ciment de 0.25 avec super plastifiant).

A la fin du malaxage, on mesure l'affaissement du béton à l'aide du cône d'Abrams ainsi que la masse volumique à l'état frais, ensuite le béton est déversé dans des moules métalliques dont les parois ont été auparavant humidifiées avec un produit de décoffrage. Le serrage du béton se fait à l'aide de la table vibrante.

Après le coulage des éprouvettes, elles sont stockées pendant 24 heures dans le laboratoire à la température ambiante puis démoulées et préparées pour l'essai désigné. Pour les essais mécaniques (compression), les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau à une température de **20 ± 5°C** jusqu'à l'échéance d'écrasement**.**

Remarque :

Dans la méthode **DREUX-GORISSE**, le squelette granulaire est déterminé d'après une courbe granulaire de référence. Cependant du fait que nous ne pas obtenus de l'affaissement et la résistance en compression, on remarque que la composition préliminaire présente une résistance au $7^{ème}$ jour très satisfaisante, mais cela au détriment de l'ouvrabilité.

Si cette consistance est ferme, elle peut être interprétée par l'importance d'élément fins (sable, ciment, fumée de silice, laitier filler, pouzzolane), ce qui a causé une forte demande en eau, pour pallier à cet inconvénient on cherchera à ajuster la quantité des granulats ainsi que celle de l'adjuvant pour obtenir une meilleure ouvrabilité.

Le squelette granulaire sera optimisé, une seconde fois, par une méthode expérimentale où on cherche par approximation successive, l'ensemble de ces proportions pour, lesquelles, on obtient simultanément, le meilleur affaissement au cône d'Abrams pour le béton frais, et la meilleure résistance en compression après $7^{ème}$ jours. Cette méthode nous permet, probablement, d'avoir une formulation locale, en fonction des matériaux et des conditions réelles de laboratoire.

La composition première du BHP en masses est la suivante :

Tableau IV.6- La composition massique avec superplastifiant et sans additions (Kg/m^3)**.**

Gravier		***Sable***	***Ciment***	***Adjuvant***	***Eau***	***E/L***
4/8	***8/16***	***670***	***450***	***8.1***	***130.14***	***0.30***
178	***1025***					

Les propriétés à l'état frais et durci de cette béton sont regroupée dans le tableau suivant :

Tableau IV.7- Résultats d'essai sur bétons à l'état frais et durcis.

	ETAT FRAIS		*ETAT DURCI*		
BHP sans additions et avec superplastifiant.	***Affaissement (cm)***	***M vbf (g/cm3)***	***fc_7 (MPa)***	***fc_{28} (MPa)***	***fc_{140} (MPa)***
	18	***2.3487***	***34***	***46***	***51***

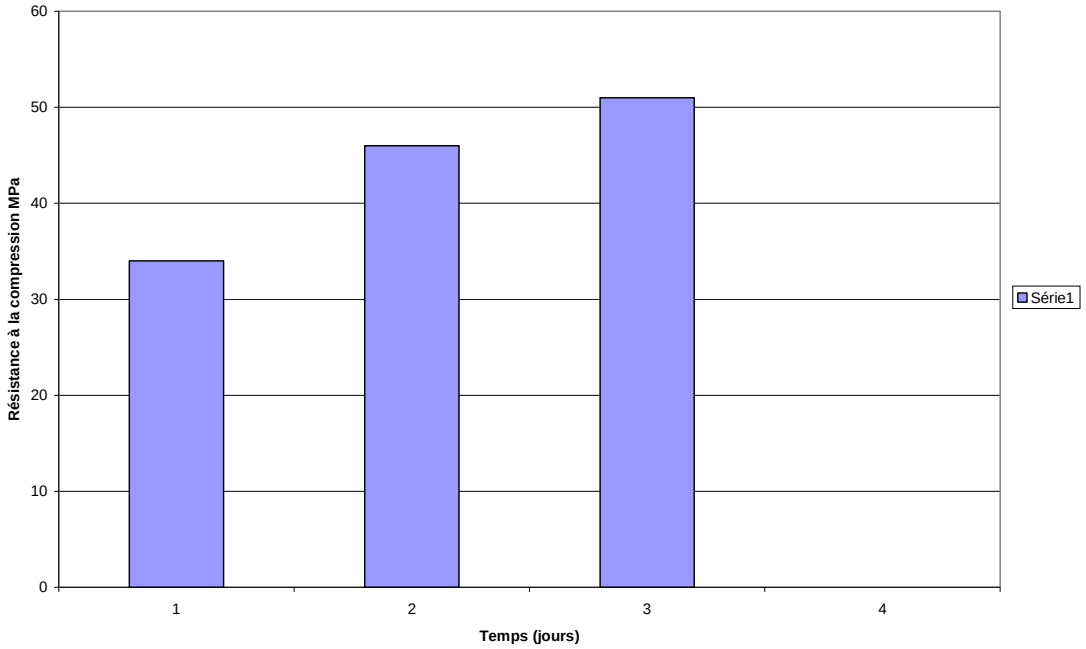


Figure IV-9 -Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton avec fluidifiant.

La composition deuxième du BHP en masses est la suivante :

Tableau IV.8- La composition massique du BHP avec superplastifiant et additions laitier et filler (Kg/m^3)**.**

Gravier		*Sable*	*Ciment*	*Adjuvant*	*Laitier*	*Filler*	*Eau*	*E/L*
4/8	***8/16***	***670***	***315***	***8.1***	***90***	***45***	***130.14***	***0.30***
178	***1025***							

Les propriétés à l'état frais et durci de cette béton sont regroupée dans le tableau suivant :

Tableau IV.9- Résultats d'essai sur bétons avec laitier et filler à l'état frais et durcis.

	ETAT FRAIS		*ETAT DURCI*		
BHP avec laitier et filler.	***Affaissement (cm)***	***M vbf (g/cm3)***	***fc_7 (MPa)***	***fc_{28} (MPa)***	***fc_{140} (MPa)***
	16	***2.51***	***38***	***48***	***54***

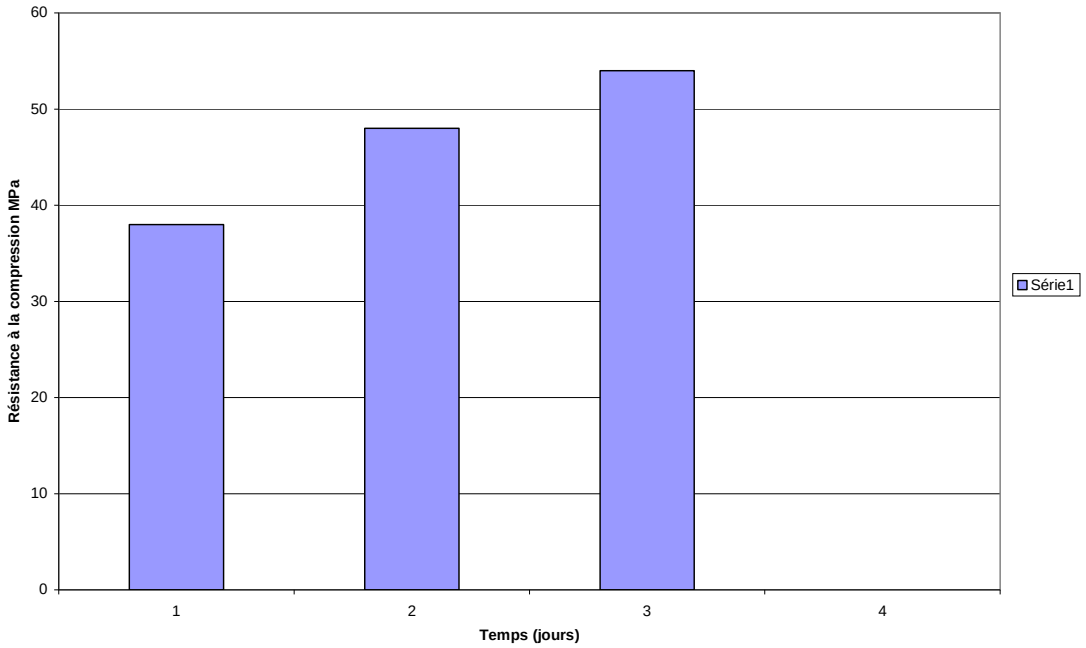


Figure IV-10 -Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton avec addition fins et fluidifiant.

La composition troisième du BO en masses est la suivante :

Tableau IV10-La composition massique du béton sans superplastifiant et sans additions (Kg/m^3)**.**

Gravier		***Sable***	***Ciment***	***Eau***	***E/L***
4/8	***8/16***	***670***	***450***	***135***	***0.30***
178	***1025***				

Les propriétés à l'état frais et durci de cette béton sont regroupée dans le tableau suivant :

Tableau IV.11- Résultats d'essai sur bétons témoin à l'état frais et durcis.

	ETAT FRAIS		*ETAT DURCI*		
B. T	***Affaissement (cm)***	***M vbf (g/cm3)***	***fc_7 (MPa)***	***fc_{28} (MPa)***	***fc_{140} (MPa)***
	12	***1.93***	***26***	***30***	***35***

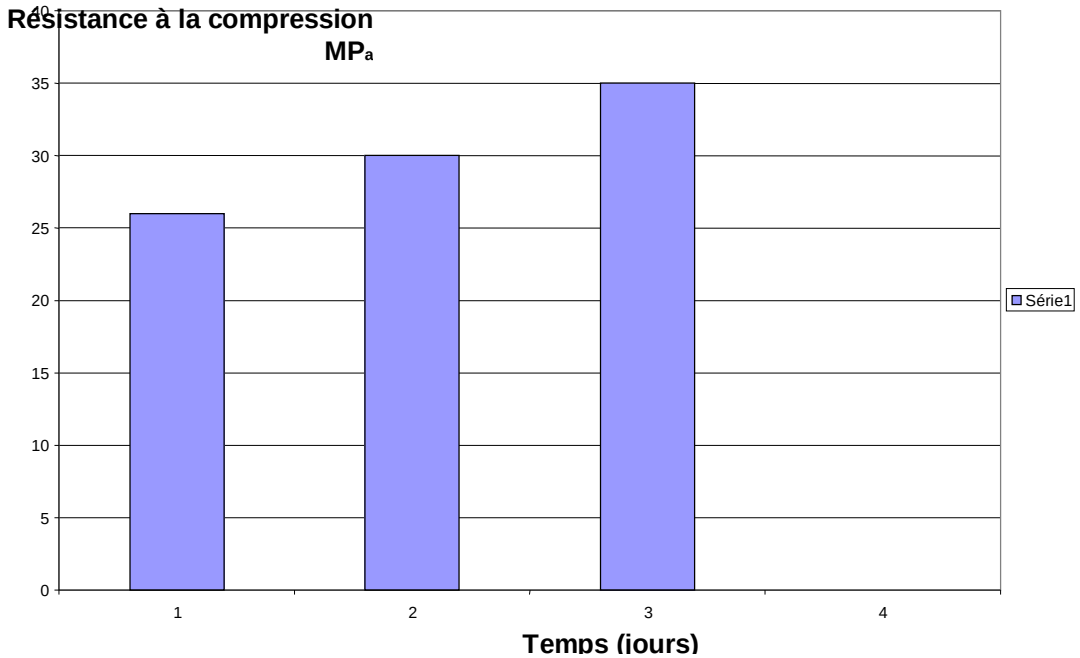


Figure IV-11 -Résultats de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps du béton témoins.

IV.4.4 Résistance à la traction

D'après le **BAEL 91** nous avons trouvées :

Tableau IV.12 Résultats à la traction sur différents types des bétons avec superplastifiants et additions fines (laitier+filler).

Résistance a la traction (MPa)			
Age du béton (jours)	*Béton avec 1.8% de fluidifiant*	*Béton avec 1.8% de fluidifiant plus laitier et filler*	*Béton témoin*
07	***4.32***	***3.9***	***3,06***
28	***10.10***	***4.5***	***3,6***
140	***6,22***	***6.7***	***3,96***

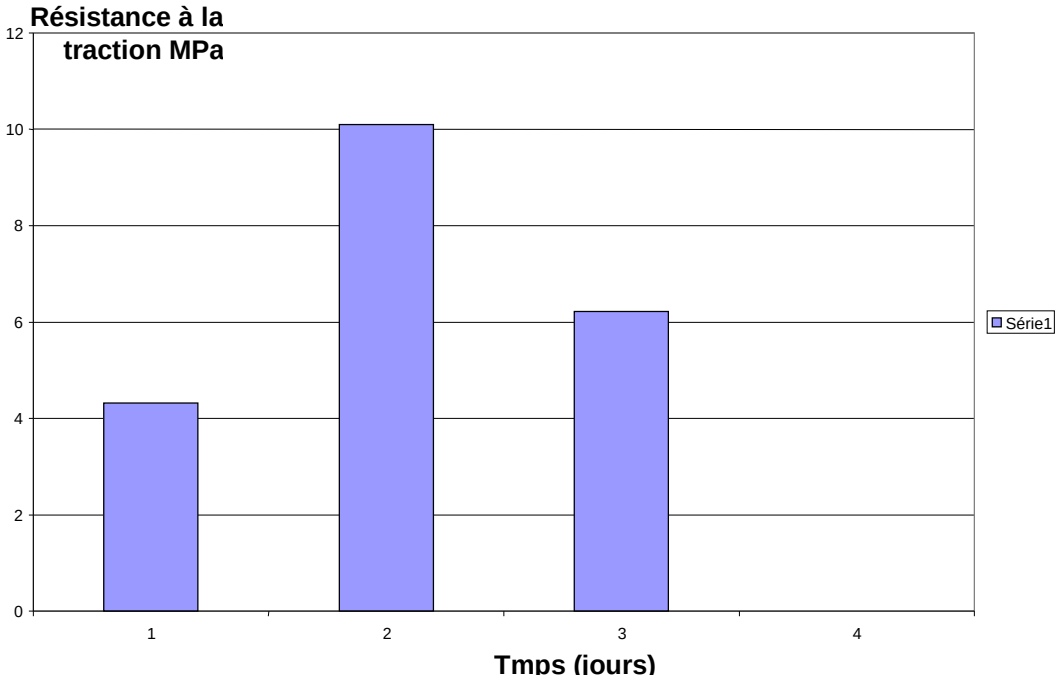


Figure IV-12 -Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton avec 1.8% de fluidifiant.

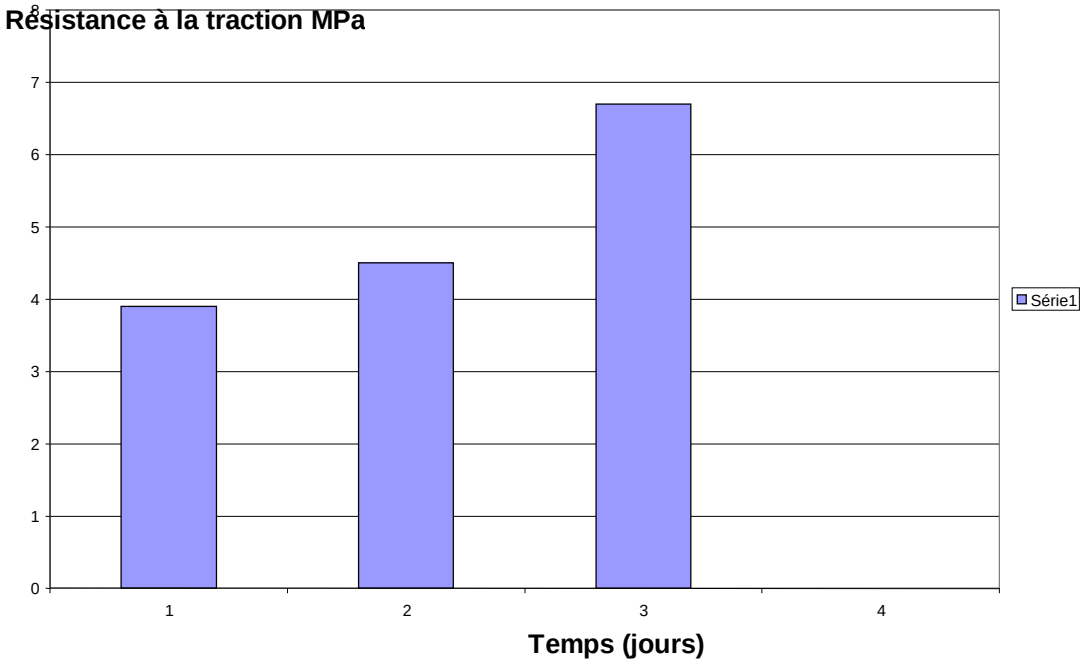


Figure IV-13 -Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton avec 1.8% de fluidifiant avec additions (laitier +filler).

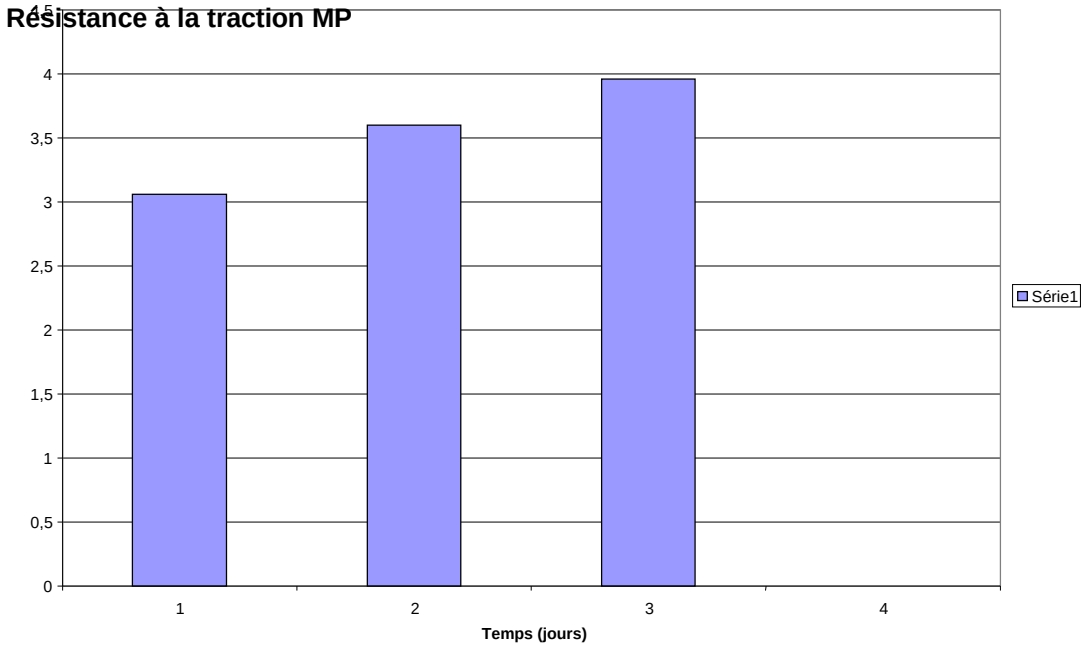


Figure IV-14 -Résultats de l'évolution de la résistance en traction en fonction du temps du béton témoin.

IV.5. Discussions et interprétations

D'après les figures (IV.7à IV.8et IV.9) présentant l'évolution des résistances mécaniques des trois bétons testés, on remarque une amélioration considérable des trois types de résistance de la compression, bien que cela été bien prévu. Béton avec 1.8% de fluidifiant avec laitier et filler; Béton avec 1.8% de fluidifiant, connaissant le rôle bénéfique de l'utilisation de superplasifiant réducteur d'eau, par rapport au béton témoin. On constate un gain de résistance considérable entre le BHP et le béton sans addition mais avec le dosage en superplasifiant est 1.8%, par rapport au béton de témoin. La résistance à la compression du BHP est améliorée relativement élevées à jeune age avec laitier + filler et 1.8% de fluidifiant, et pour le béton avec 1.8% de fluidifiant¸ par rapport au béton témoin. Il est de même pour la résistance à la traction.

Cette amélioration des trois types de résistances est attribuée d'un côté à la bonne qualité des matériaux locaux utilisés (gros granulats), puisque même pour le béton témoin, les résistances en compression et en traction sont bien satisfaisantes. Et d'un autre côté l'introduction du laitier et du filler qui a conduit à une croissance appréciable de résistances, cela est due évidemment au double rôle que joue le laitier et les fillers dans la matrice du béton.

Premièrement elle densifie la pâte de ciment grâce à-la caractère de ces particules ultrafines qui placer entre dans les pores crées lors de l'hydratation du ciment et entre les granulats et les produits d'hydratation, zone ou le maillon le plus sensible à la rupture dans un béton ordinaire surtout sous traction, ce n'est plus le cas dans un béton contenant des additions (laitier + filler) où cette zone est plus dense et compact.

Deuxièmement, le laitier qui est stable dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau environ en se précipitant sous forme de C-S-H avec libéré lors de l'hydratation du ciment et par conséquent l'hydroxyde de calcium Ca(OH)2 la résistance mécanique du béton s'améliore, en général, selon la résistance visée.

L'effet de dosage de filler sur la demande en superplastifiants est de conduire de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison.

La densité du béton au laitier avec filler de calcaire est nettement plus grande que pour le béton avec fluidifiant et sans addition, et le béton avec 1.8% de fluidifiant est plus densifié que le béton témoin.

Le béton de 1.8% de fluidifiant présente des évolutions très importantes des résistances au cours de leurs cycles de durcissement, surtout après 28 jours, par apport au béton de témoin, puisque la réactivité de la phase interstitielle contrôle la rhéologie du béton.

En vue de compléter ce travail nous proposons des problèmes plus profondément les points suivants :

- l'influence du type et du dosage des autres additions minérales sur le comportement des BHP vis-à-vis de la résistance en traction.
- l'influence du type et des dosages en superplastifiant sur les comportements rhéologiques, et la compatibilité ciment-superplastifiant
- l'influence de la finesse des additions fines, une augmentation du dosage en superplastifiant.
- quels sont les effets de changement de volume du BHP sur la microfissuration et la nature de liaison entre le granulat et le ciment ?
- doit on avoir un règlement et la simulation pour la formulation des BHP.

Conclusion et perspective

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'étude rhéologique du béton à hautes performances sous conditions locales.

Les éléments bibliographiques, nous ont permis de mettre en évidence les paramètres qui d'influent sur les matériaux à base de matrice cimentaire, aussi bien à l'état frais ou durci. Il s'agit notamment :

- de la nature des granulats,

- du rapport Eau/Liant,

- du dosage en adjuvant et plus précisément le super plastifiant, adjuvant spécifique des bétons à hautes performances.

- des qu'elles soient de nature minérales ou pouzzolaniques.

Dans cette étude, nous avons présenté les caractéristiques des matériaux sélectionnés pour nos essais : granulats, ciment, additions, adjuvants.

Les programmes expérimentaux, concernant à l'étude des coulis et des bétons ; donc à l'état frais et à l'état durci.

Concernant les coulis, leur caractérisation a été validée selon la méthode du Cône de Marsh, méthode qui permet de le temps d'écoulement de la pâte, quelque soit sa composition fluidifiée ou non, contenant ou pas des additions fines.

Ces essais nous ont permis de déterminer le temps d'écoulement et le point de saturation pour chaque composition.

Donc nous avons abouté donnée et des caractéristiques mécaniques qui seront confirmées dans la deuxième partie expérimentale.

L'influence de l incorporation d'additions (pouzzolanes, fumées de silice, laitier à hautes fourneau, filler s'est traduite selon nos essais surtout par une compacité plus grande.

L'utilisation d'un super plastifiant, donc un adjuvant haut réducteur d'eau, a permit, l'utilisation des additions en améliorant la maniabilité, surtout pour un dosage de 1.8%, et donc de fixée un point de saturation.

Il faut rappeler qu'utiliser l'adjuvant à sa dose de saturation même s'il n'est pas très économique est justifié par les qualités secondaires du béton obtenu. Nous remarquons donc que la dose de saturation, dose la plus faible pour laquelle le temps d'écoulement est minimal est choisie pour la suite des essais. C'est une approche expérimentale.

Il n'y a pas des règles établies pour la composition d'un béton à hautes performances. Comme nous l'avons ou dans l'étude bibliographique, il y a plusieurs propositions à trouves

les universités du monde et surtout dans les laboratoires travaillant en collaboration, avec secteur des bâtiments et des travaux publiques, il y a surtout des exigence à satisfaire concernant ce béton particulier.

L'exploitation des résultats expérimentaux obtenus dans ce modeste de travail nous péneste de mettre en évidence deux avantages majeurs de notre contribution :

Grâce à l'utilisation des additions et du superplasifiant, nous avons pu obtenir des résistance mécaniques assez élevée, exemple une résistance à la compression dépassant les *50MPa long terme,* et donc une résistance à la traction qui augmente elle aussi suivant les relations émises par les règlements en vigueur.

Comme on a pu montrer dans ce mémoire, il existe de nombreuses variantes possibles pour la formulation d'un BHP. Il sera donc très intéressant d'étudier la possibilité de confectionner un BHP à partir des matériaux locaux qui existent en Algérie pour pouvoir par la suite réaliser une étude technico-économique. Ces études nous permettront de définir avec exactitude les avantages d'utilisation du BHP dans le domaine de construction en Algérie.

Le domaine des BHP étant très vaste, fonctions de tous les paramètres existants dans les caractéristiques, des compositions, peut nous ouvrir d'autres axes de recherches, pour d'autres études aussi nous pouvons citer :

- Durabilité supérieure vis-à-vis des agressions physico-chimiques ;
- Fluidité importante du béton à l'état frais facilitant généralement la mise en oeuvre ;
- Résistance élevée au jeune age favorisant l'optimisation des cycles de décoffrage et de mise en tension des câbles de précontrainte ;
- Augmentation du module d'élasticité et amélioration de la stabilité aérodynamique des structures élancées ;
- Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles ce qui permet de réduire les sections d'armatures ;
- Majoration des contraintes de cisaillement admissibles. Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales.

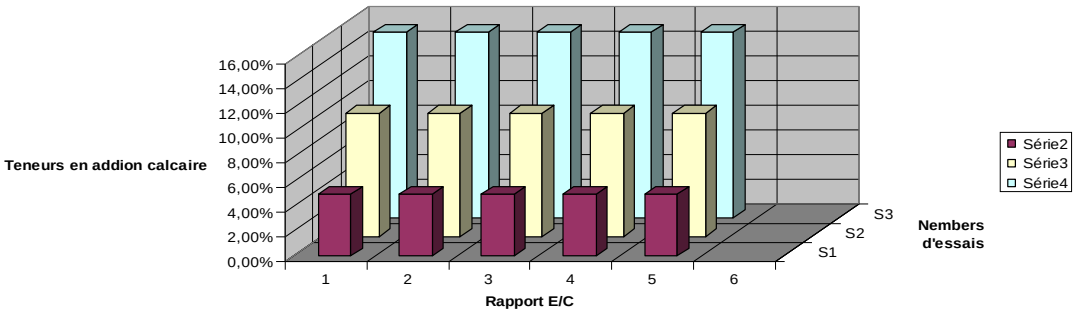
ANNEXES A

A.I- Notation adoptée des coulis

a) **CP :** (pâte pure) désigne le témoin ;
b) **CAC** : coulis avec additions fines calcaire ;
c) **CAP** : coulis avec additions fines pouzzolane ;
d) **CAL :** coulis avec additions fines laitiers,
e) **CF :** coulis sans additions et avec superplastifiant ;
f) **CFAC:** coulis fluidifiant avec additions calcaire ;
g) **CFAP :** coulis fluidifiant avec additions pouzzolane ;
h) **CFAL :** coulis fluidifiant avec additions laitier.

Tableau A-1 - Désignation des compositions des différents coulis testés.

Réf	***Notation***	***Désignation***
01	***CP***	*Pâte pure*
02	***CAC***	*Coulis avec addition fine calcaire en teneur égale **5 %** du poids du ciment.*
	CAC	*Coulis avec addition fine calcaire en teneur égale **10%** du poids du ciment.*
03	***CAP***	*Coulis avec addition fine pouzzolane en teneur égale **5%** du poids du ciment.*
	CAP	*Coulis avec addition fine pouzzolane en teneur égale **10%** du poids du ciment.*
	CAP	*Coulis avec addition fines pouzzolane en teneur égale **15%** de la poids du ciment.*
04	***CAL***	*Coulis avec addition fine laitier en teneur égale **5%** du poids du ciment.*
	CAL	*Coulis avec addition fine laitier en teneur égale **10%** du poids du ciment.*
	CAL	*Coulis avec addition fine laitier en teneur égale **15%**du poids du ciment.*
	CAL	*Coulis avec addition fine laitier en teneur égale **20%** du poids du ciment.*
	CAL	*Coulis avec addition fine laitier en teneur égale **22%** du poids du ciment.*
05	***CF***	*Coulis fluidifiant avec différent dosage de superplastifiant.*
06	***CFAC***	*Coulis fluidifiant avec addition fine calcaire en teneur égale **5%** du poids du ciment.*
	CFAC	*Coulis fluidifiant avec addition fine calcaire en teneur égale **10%** du poids du ciment*
07	***CFAP***	*Coulis fluidifiant avec addition fine pouzzolane en teneur égale **5%** du poids du ciment.*
	CFAP	*Coulis fluidifiant avec addition fine pouzzolane en teneur égale **10%** du poids du ciment.*
	CFAP	*Coulis fluidifiant avec addition fine pouzzolane en teneur égale **15%** du poids du ciment.*
08	***CFAL***	*Coulis fluidifiant avec addition fine laitier en teneur égale **5%** du poids du ciment.*
	CFAL	*Coulis fluidifiant avec addition fine laitier en teneur égale **10%** du poids du ciment.*
	CFAL	*Coulis fluidifiant avec addition fine laitier en teneur égale **15%** du*



		poids du ciment
	CFAL	*Coulis fluidifiant avec addition fine laitier en teneur égale **20%** du poids du ciment.*
	CFAL	*Coulis fluidifiant avec addition fine laitier en teneur égale **22%** du poids du ciment.*

A.II Démarches expérimentales adoptées

Le programme expérimental à été réalisé en plusieurs étapes en utilise le cône de Marsh, pour mesurer la compatibilité rhéologique. L'optimisation et la caractérisation des coulis d'un ciment donner, fluidifié ou non avec ou sans additions.

A.III Choix du coulis de référence

Le chois du coulis de référence est fait selon l'appréciation du temps d'écoulement pour un ensemble des coulis ayant un rapport E/C croissant. Mesurer son temps d'écoulement au cône de Marsh. Le processus opératoire est un alors fixé pour tous les essais suivant, ce temps sera le temps d'écoulement de référence.

A.III.1 Les coulis sans additions et sans fluidifiant

Pâtes pures CP (témoin), on à effectué dans cette première série d'essais d'écoulement sur pâte pure en faisant varier le rapport E/C de : 0.25 à 0.42 ; avec pas de 0.05.

Tableau A-2- Différents rapports E/C adoptés de pâte pure.

Coulis	***Rapports E/C***				
CP	**0.25**	**0.30**	**0.35**	**0.40**	**0.42**

A.III.2 Les coulis avec additions fines calcaires sans fluidifiant

Cette deuxième série d'essais avec différents types d'additions fines, consiste à faire varier la teneur en addition fine calcaire pour chaque rapport E/C. Cette série d'essai permet d'apprécier l'influence du type et du dosage en additions sur la fluidité des coulis de ciment.

Tableau A-3- Différentes coulis avec différentes teneurs en addition fine calcaire.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
02	*CAC*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
		10%	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
		15%	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*

Figure A-1- Rapport E/C en fonction de teneur en additions fines calcaire.

Tableau A-4 - Différentes coulis avec différentes teneurs addition fin pouzzolane**.**

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
03	*CAP*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
		10%	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
		15%	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*

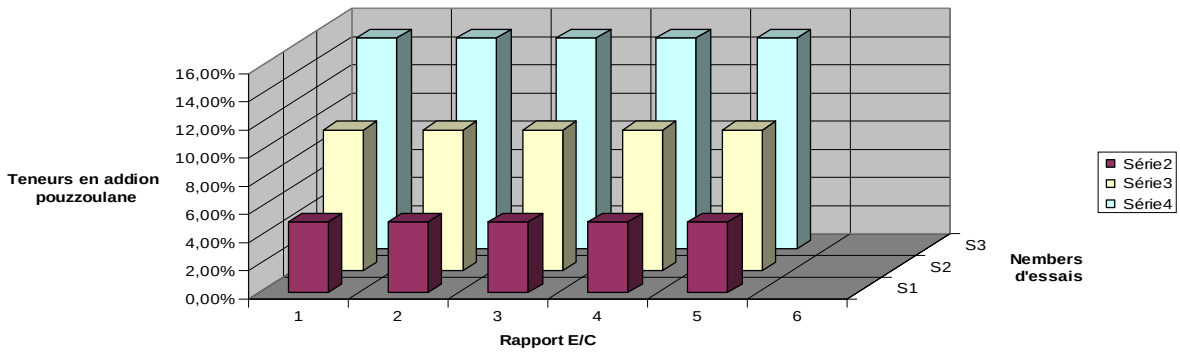


Figure A-2- Rapport E/L en fonction de teneur en additions fines pouzzolane.

Tableau A-5- Différentes coulis avec différentes teneurs addition fin laitier.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
04	*CAL*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
		10%	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
		15%	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
		20%	*20%*	*20%*	*20%*	*20%*
		22%	*22%*	*22%*	*22%*	*22%*

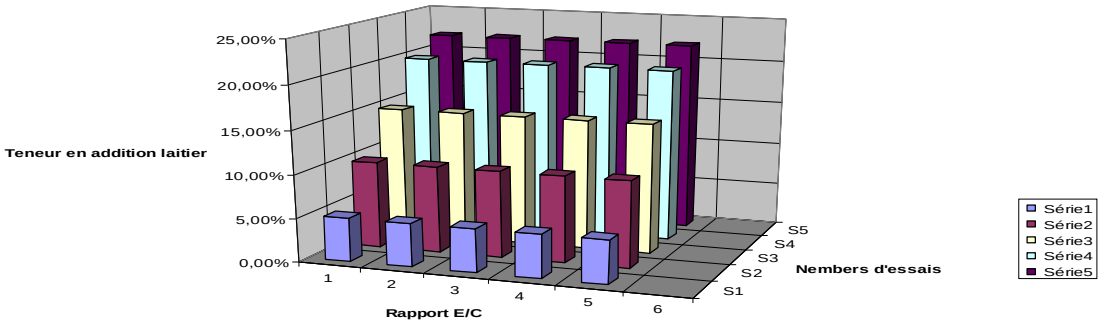


Figure A-3- Rapport E/L en fonction de teneur en additions fines laitier.

A.III.3 Les coulis avec fluidifiant

A. III.3.1 Dosage en superplastifiant des coulis à hautes performances

Pour chaque coulis haute performance, chercher le dosage en eau tel qu'en présence de 0.5% de superplastifiant du poids de ciment (en extrait sec). La consistance soit fluide, mais «épaisse» puis, mesurer l'évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage croissant en adjuvant (à teneur en eau totale constante et en refabriquant pour chaque mesure un nouveau coulis, de teneur en adjuvant supérieur à la précédent) **[02].**

Dans cette série d'essai consiste à faire varier le teneur en superplastifiant selon la plage d'utilisation par le fournisseur pour chaque rapport E/C.

Tableau A-6- Différentes composition des coulis fluidifiés, avec différents dosages en superplastifiant.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.4***	***0.42***
05	*CF*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*
		0.6%	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*
		0.8%	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*
		1%	*1%*	*1%*	*1%*	*1%*
		1.2%	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*
		1.4%	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*
		1.6%	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*
		1.8%	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*
		2.0%	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*

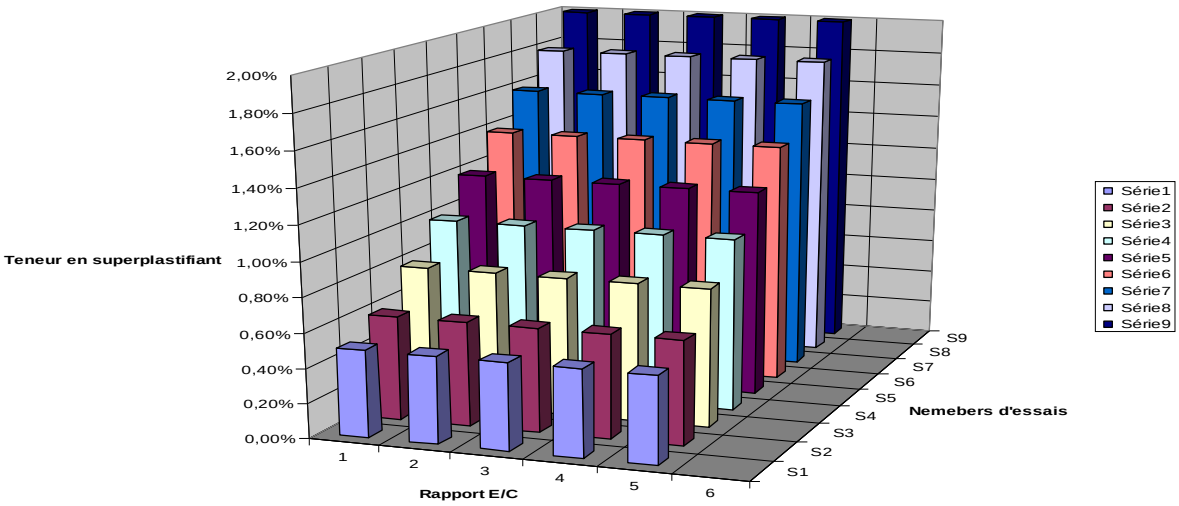


Figure A-4- Rapport E/C en fonction de teneurs en superplastifiant et séries des mélanges.

A. III.4 Coulis fluidifié avec additions fines

Dans cette étape d'essai nous avons varié la teneur en additions fines, pour chaque rapport E/C et aussi la teneur en fluidifiant.

Tableau A-7- Différentes compositions coulis avec différentes teneurs en addition fine calcaire et dosage du superplastifiant.

Réf	**E/C**	*CFAC*	*SP%*								
06	**0.25**	*5%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.25	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.25	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*

Tableau A-8- Différentes compositions coulis avec différentes teneurs en addition fine pouzzolane et dosage du superplastifiant.

Réf	**E/C**	*CFAP*	*SP%*								
07	**0.25**	*5%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*05%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.25	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*10%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.25	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.30	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.35	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.40	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*
	0.42	*15%*	*0.5%*	*0.6%*	*0.8%*	*1.0%*	*1.2%*	*1.4%*	*1.6%*	*1.8%*	*2.0%*

Tableau A-9- Différentes compositions coulis avec différentes teneurs en addition fine laitières et dosage du superplastifiant.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
08	*CFAL*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
		10%	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
		15%	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
		20%	*20%*	*20%*	*20%*	*20%*
		22%	*22%*	*22%*	*22%*	*22%*
	SP%	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*
		0.6%	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*
		0.8%	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*
		1.0%	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*
		1.2%	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*
		1.6%	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*
		1.8%	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*
		2.0%	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*

ANNEXES B

B.I Mesure du temps d'écoulement

À fin d'effectuer la mesure du temps d'écoulement au cône Marsh, nous avons mis au point le mode opératoire suivant :

- Mouiller la cuve du malaxage et la palette ensuite les essuyer légèrement ;
- Suivre les étapes, d'introduction des constituants, définies précédemment en prenant bien le soin de racler les parois avec la palette à chaque arrêt du malaxage ;
- A la fin de l'opération du malaxage, remplir le cône d'une quantité de coulis ;
- Faire actionner en même temps, le dispositif d'ouverture du cône et le chronomètre.
- Arrêter le chronomètre dès que la matière déborde du flacon *1000ml* ;
- Enregistrer alors le temps d'écoulement, juste après le remplissage du récipient **[2]**

a) Première cas variation de la quantité d'eau

D'après la sélectionner les rapports E/C, dans ce cas nous avons variés le teneur d'eau, à chaque rapport E/C pour teneur en ciment fixée.

Tableau B-1- compositions des coulis pour chaque rapport E/C.

E/C	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
C (g)	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
E (g)	*437.5*	*525*	*612.5*	*700*	*735*

B.II Première série d'essai

Temps d'écoulement mesuré sur les différents coulis témoins **CP,** pour un dosage du ciment 350 kg/m^3**,** pour chaque rapport **E/C**.

Tableau B-2- Mesure du temps d'écoulement sur les coulis **CP**.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
01	***C (g)***	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
	E (g)	*437.5*	*525*	*612.5*	*700*	*735*
	Temps d'écoulement (s)	***>1h.30***	***>1h.30***	***>1h.30***	***180***	***80.27***

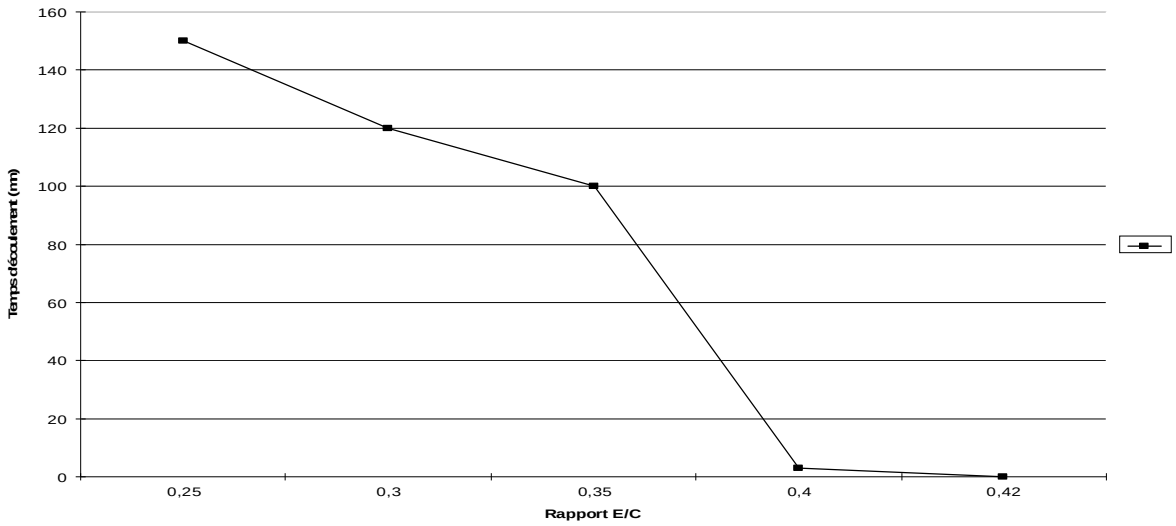


Figure B-1- Le rapport E/C en fonction de temps d'écoulement.

B.III Deuxième série d'essai

Temps d'écoulement mesuré sur différent coulis avec additions fines, et sans superplastifiant, pour tous les rapports E/C.

Tableau B-3- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine calcaire.

Réf	***E/C***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
02	***C (g)***	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
	E (g)	*437.5*	*525*	*612.5*	*700*	*735*
	CAC %	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***10 minutes et 50 s***	***26.29***	***14.36***
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***02minutes et 30 s***	***17.11***	***12.39***
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***50.11***	***12.35***	***11.16***

Remarque

Nous remarquons:

- Le temps d'écoulement >1^{h}.30 min**,** de la pâte du coulis, reste figée dans le cône ;
- Plus le pourcentage de calcaire augmente plus le temps d'écoulement diminué, c'est-à-dire que l'effet de filler influe sur le comportement rhéologique du ciment, qui est un filler, réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former "v" en air occlus ou volume de vide**.** Les fillers peuvent améliorer l'hydratation du ciment Portland. Étant donné que l'action des fillers est avant tout physique, ils doivent être physiquement compatibles avec le ciment auquel ils sont ajoutés.

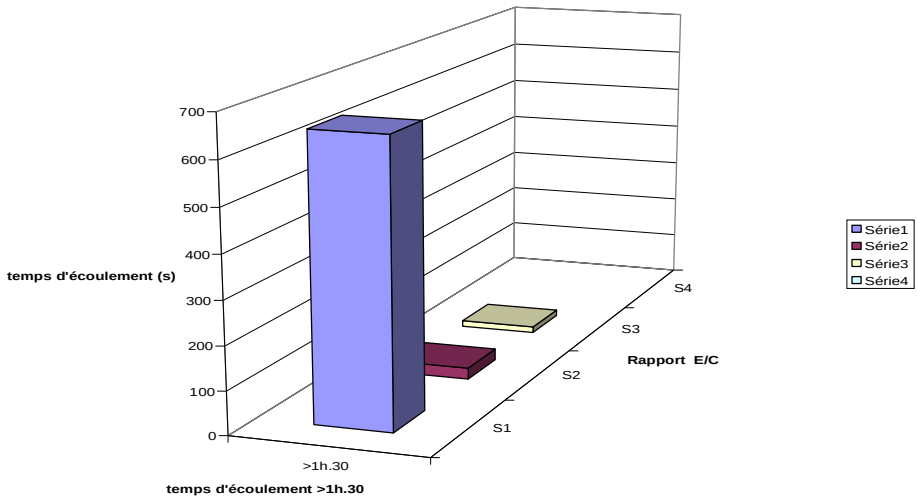


Figure B-2- Le rapport E/L en fonction de temps d'écoulement des coulis avec5% addition calcaire.

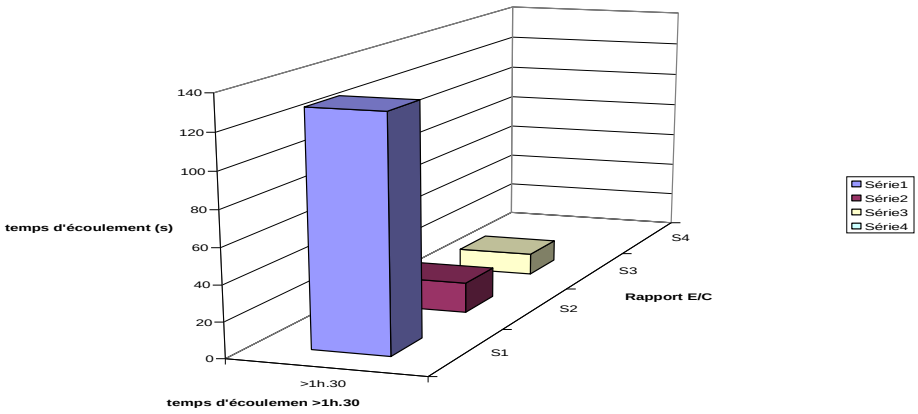


Figure B-3- Le rapport E/L en fonction de temps d'écoulement des coulis avec10% addition calcaire.

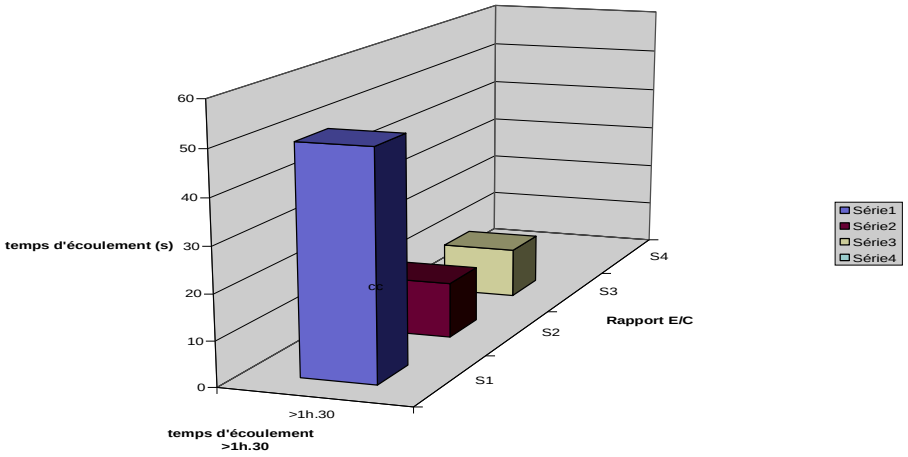


Figure B-4- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec15% addition calcaire.

Tableau B-4- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine pouzzolane.

Réf	***E/L***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
03	***C (g)***	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
	E (g)	*437.5*	*525*	*612.5*	*700*	*735*
	CAP %	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***41minutes et 40 s***	***25minutes et 35 s***
	CAP %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***30 minutes***	***23minutes et 35 s***
	CAP %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement (s)		***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***>1^{h}.30 min***	***23minutes et 20 s***

Remarque

Nous remarquons aussi :

Plus le pourcentage de pouzzolane augmente le rapport E/C diminuant, la pâte de coulis **>1^{h}.30 min** reste figée dans le cône et entre l'état prise.

Tableau B-5- Mesure du temps d'écoulement des différents coulis avec addition fine laitier.

Réf	*E/C*	*0.25*	*0.30*	*0.35*	*0.40*	*0.42*
04	*C (g)*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
	E (g)	*437.5*	*525*	*612.5*	*700*	*735*
	CAL %	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*	*5%*
Temps d'écoulement (s)		*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*34.59*
	CAL %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement (s)		*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*1 minute et 21 s*	*23.91*
	CAL %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement (s)		*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*36.07*	*1 minute et 13 s*
	CAL %	*20%*	*20%*	*20%*	*20%*	*20%*
Temps d'écoulement (s)		*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*1 minute et 10 s*	*20.05*
	CAL %	*22%*	*22%*	*22%*	*22%*	*22%*
Temps d'écoulement (s)		*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*>1h.30 min*	*1 minute et 22 s*	*19.12*

Remarques

Nous avons remarqués que :

Plus le pourcentage de laitier augmente plus le temps d'écoulement >1h.30 min**,** dans le cas le rapport E/C diminué; c'est-à-dire la pâte de coulis entrant à l'état durci et le coulis reste figée dans le cône.

B.IV Troisième série d'essai

Dans ce cas, le temps d'écoulement mesuré sur les différents coulis fluidifiant, consiste à faire varié le rapport E/C ; et aussi chercher le point de saturation pour chaque rapport E/C. Les différents coulis testés dans cette étape sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau B-6- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifié

Réf	*E/C*	*0.25*	*0.30*	*0.35*	*0.40*	*0.42*
05	*C (g)*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*	*1750*
	E (g)	*432,25*	*519,75*	*607,25*	*694,75*	*729,75*
	SP %	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*
Temps d'écoulement (s)		*30.54*	*25.12*		*28.16*	*26.99*
	E (g)	*427*	*514,5*	*602*	*689,5*	*724,5*
	SP %	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*
Temps d'écoulement (s)		*30.14*	*14.22*		*25.68*	*23.78*
	E (g)	*429,1*	*516,6*	*604,1*	*691,6*	*726,6*
	SP %	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*
Temps d'écoulement (s)		*29.59*	*13.52*		*13.85*	*12.36*
	E (g)	*427*	*514,5*	*602*	*689,5*	*724,5*
	SP %	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*
Temps d'écoulement (s)		*28.94*	*19.47*		*11.45*	*10.14*
	E (g)	*424,9*	*512,4*	*599,9*	*687,4*	*722,4*
	SP %	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*
Temps d'écoulement (s)			*12.01*		*10.87*	*09.78*

	E (g)	*422,8*	*510,3*	*597,8*	*685,3*	*720,3*
	SP %	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*
Temps d'écoulement (s)						
	E (g)	*420,7*	*508,2*	*595,7*	*683,2*	*718,2*
	SP %	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*
Temps d'écoulement (s)			***11.47***		***10.25***	***08.49***
	E (g)	*418,6*	*506,1*	*593,6*	*681,1*	*716,1*
	SP %	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*
Temps d'écoulement (s)			***11.17***		***09.82***	***06.12***
	E (g)	*416,5*	*504*	*591,5*	*679*	*714*
	SP %	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*
Temps d'écoulement (s)			***22.32***		***08.65***	***05.32***

B.V Quatrième série d'essai

Dans ce cas, nous avons faire les essais sur les coulis fluidifiant ; avec additions fines, nous avons varié la teneur en additions fines et la teneur fluidifiant, pour chaque coulis de rapport E/C.

Tableau B-7- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fin calcaire.

Réf	***E/L***	***0.25***	***0.30***	***0.35***	***0.40***	***0.42***
06	***C (g)***	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*432,25*	*519,75*	*607,25*	*694,75*	*729,75*
	SP (g)	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*	*0.5%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)			***50.45***			
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)			***38.12***			
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)			***31.10***			
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*431,2*	*518,7*	*606,2*	*693,7*	*728,7*
	SP (g)	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*	*0.6%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*429,1*	*516,6*	*604,1*	*691,6*	*726,6*
	SP %	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*	*0.8%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*

Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*427*	*514,5*	*602*	*689,5*	*724,5*
	SP %	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*	*1.0%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*424,9*	*512,4*	*599,9*	*687,4*	*722,4*
	SP %	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*	*1.2%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*422,8*	*510,3*	*597,8*	*685,3*	*720,3*
	SP %	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*	*1.4%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*420,7*	*508,2*	*595,7*	*683,2*	*718,2*
	SP %	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*	*1.6%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						

	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*418,6*	*506,1*	*593,6*	*681,1*	*716,1*
	SP %	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*	*1.8%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*	*1662.5*
	E (g)	*416,5*	*504*	*591,5*	*679*	*714*
	SP %	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*	*2.0%*
	CAC %	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*	*05%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*	*1575*
	CAC %	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*	*10%*
Temps d'écoulement(s)						
	C (g)	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*	*1487.5*
	CAC %	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*	*15%*
Temps d'écoulement(s)						

Remarque

Vue de manque des additions minérales fines, nous avons fixé le rapport **E/L = 0.3**, dans les cas suivant :

Tableau B.8- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fine pouzzolane.

Réf	*E/L*	*C (g)*	*E (g)*	*SP (g)*	*CAP%*	*Temps d'écoulement(s)*
07	***0.3***	*1662.5*	*519,75*	*0.5%*	*05%*	***45.05***
		1662.5	*518.7*	*0.6%*	*05%*	***43.11***
		1662.5	*516.6*	*0.8%*	*05%*	***42.57***
		1662.5	*514.5*	*01%*	*05%*	***42.12***
		1662.5	*512.4*	*1.2%*	*05%*	***41.99***
		1662.5	*510.3*	*1.4%*	*05%*	***42.23***
		1662.5	*508.2*	*1.6%*	*05%*	***39.48***
		1662.5	*506.1*	*1.8%*	*05%*	***48.66***
		1662.5	*504*	*02%*	*05%*	***55.65***
		1575	*519,75*	*0.5%*	*10%*	***40.15***
		1575	*518.7*	*0.6%*	*10%*	***39.68***
		1575	*516.6*	*0.8%*	*10%*	***37.47***
		1575	*514.5*	*01%*	*10%*	***40.87***
		1575	*512.4*	*1.2%*	*10%*	***38.86***
		1575	*510.3*	*1.4%*	*10%*	***37.97***
		1575	*508.2*	*1.6%*	*10%*	***36.48***
		1575	*506.1*	*1.8%*	*10%*	***42.93***
		1575	*504*	*02%*	*10%*	***50.98***
		1487.5	*519,75*	*0.5%*	*15%*	***38.20***
		1487.5	*518.7*	*0.6%*	*15%*	***30.12***
		1487.5	*516.6*	*0.8%*	*15%*	***27.45***
		1487.5	*514.5*	*01%*	*15%*	***25.14***
		1487.5	*512.4*	*1.2%*	*15%*	***33.89***
		1487.5	*510.3*	*1.4%*	*15%*	***32.74***
		1487.5	*508.2*	*1.6%*	*15%*	***31.87***
		1487.5	*506.1*	*1.8%*	*15%*	***30.93***
		1487.5	*504*	*02%*	*15%*	***01.02.01***

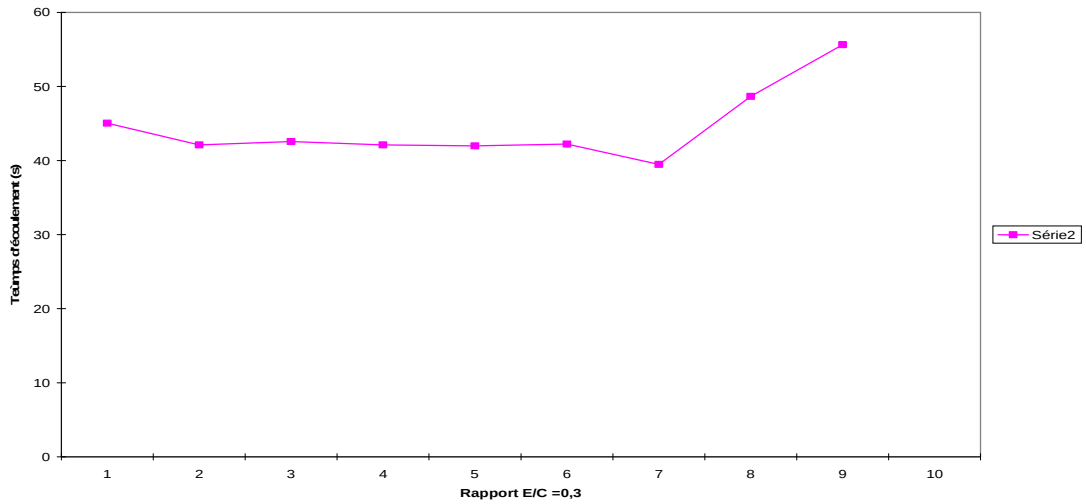


Figure B-5- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec05% addition pouzzolane et avec fluidifiant.

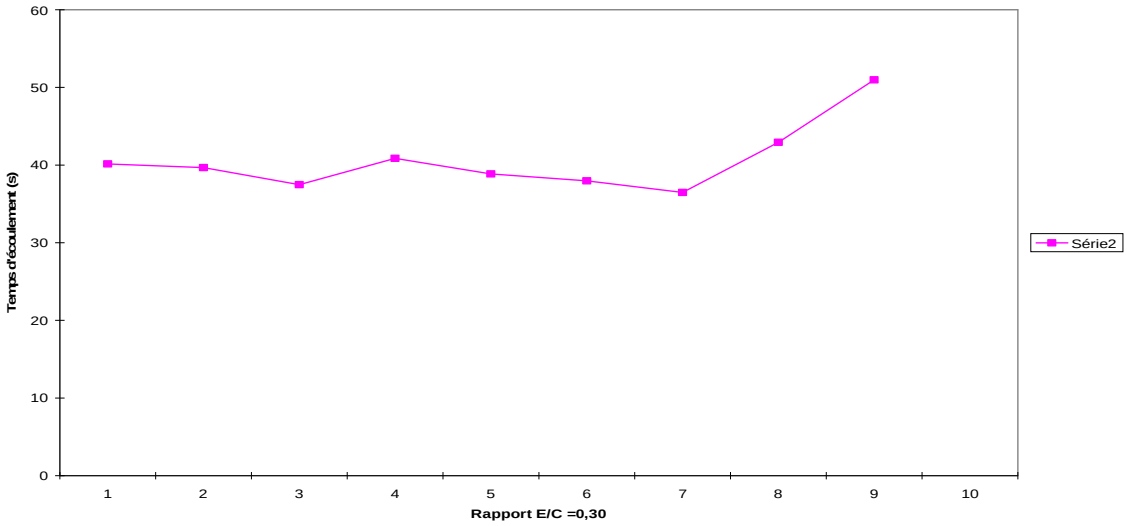


Figure B-6- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec10% addition pouzzolane et avec fluidifiant.

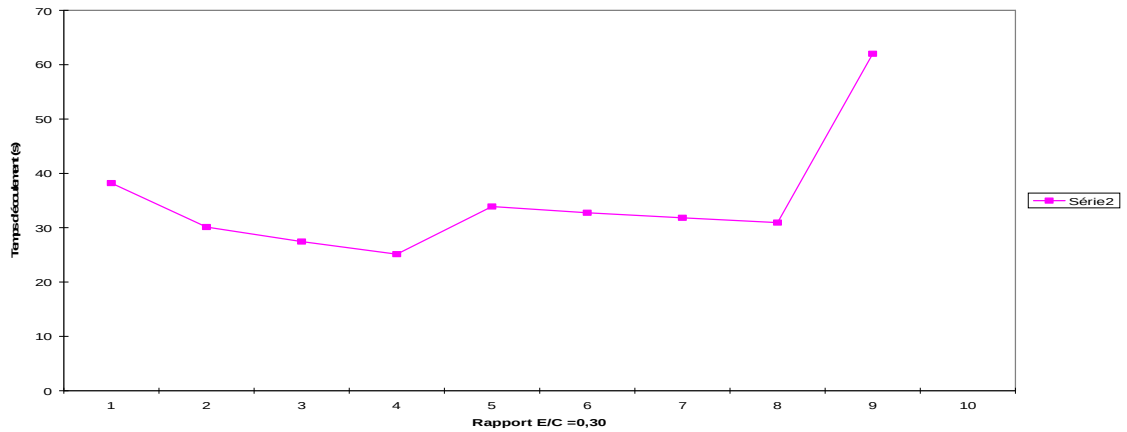


Figure B-7- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec15% addition pouzzolane et avec fluidifiant.

Tableau B-9- Mesure du temps d'écoulement sur différents coulis fluidifiant avec addition fin laitier.

Réf	*E/L*	*C (g)*	*E (g)*	*SP (g)*	*CAL%*	*Temps d'écoulement(s)*
05	***0.3***	*1662.5*	*519,75*	*0.5%*	*05%*	***56.20***
		1662.5	*518.7*	*0.6%*	*05%*	***54.12***
		1662.5	*516.6*	*0.8%*	*05%*	***53.10***
		1662.5	*514.5*	*01%*	*05%*	***52.14***
		1662.5	*512.4*	*1.2%*	*05%*	***50.32***
		1662.5	*510.3*	*1.4%*	*05%*	***49.51***
		1662.5	*508.2*	*1.6%*	*05%*	***47.89***
		1662.5	*506.1*	*1.8%*	*05%*	***48.14***
		1662.5	*504*	*02%*	*05%*	***45.86***
		1575	*519,75*	*0.5%*	*10%*	***45.20***
		1575	*518.7*	*0.6%*	*10%*	***43.55***
		1575	*516.6*	*0.8%*	*10%*	***42.47***
		1575	*514.5*	*01%*	*10%*	***41.88***
		1575	*512.4*	*1.2%*	*10%*	***38.55***
		1575	*510.3*	*1.4%*	*10%*	***36.62***
		1575	*508.2*	*1.6%*	*10%*	***35.14***
		1575	*506.1*	*1.8%*	*10%*	***32.19***
		1575	*504*	*02%*	*10%*	***30.02***
		1487.5	*519,75*	*0.5%*	*15%*	***15.10***
		1487.5	*518.7*	*0.6%*	*15%*	***14.25***
		1487.5	*516.6*	*0.8%*	*15%*	***14.00***
		1487.5	*514.5*	*01%*	*15%*	***13.87***
		1487.5	*512.4*	*1.2%*	*15%*	***13.22***
		1487.5	*510.3*	*1.4%*	*15%*	***14.87***
		1487.5	*508.2*	*1.6%*	*15%*	***13.13***
		1487.5	*506.1*	*1.8%*	*15%*	***12.89***
		1487.5	*504*	*02%*	*15%*	***14.09***

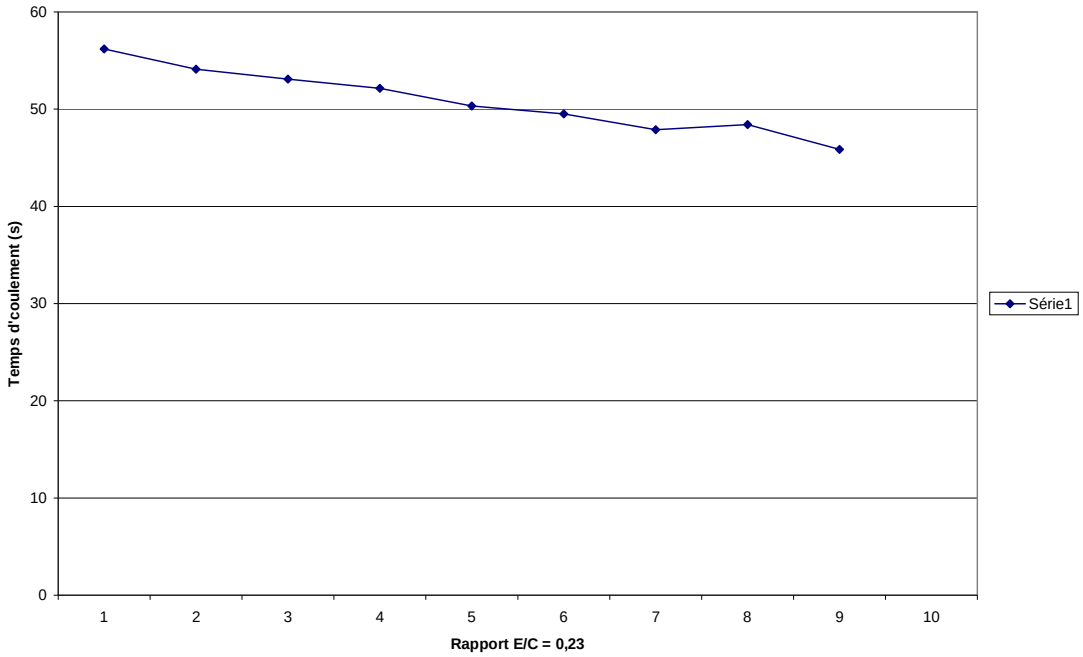


Figure B-8- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 05% addition laitier et avec fluidifiant.

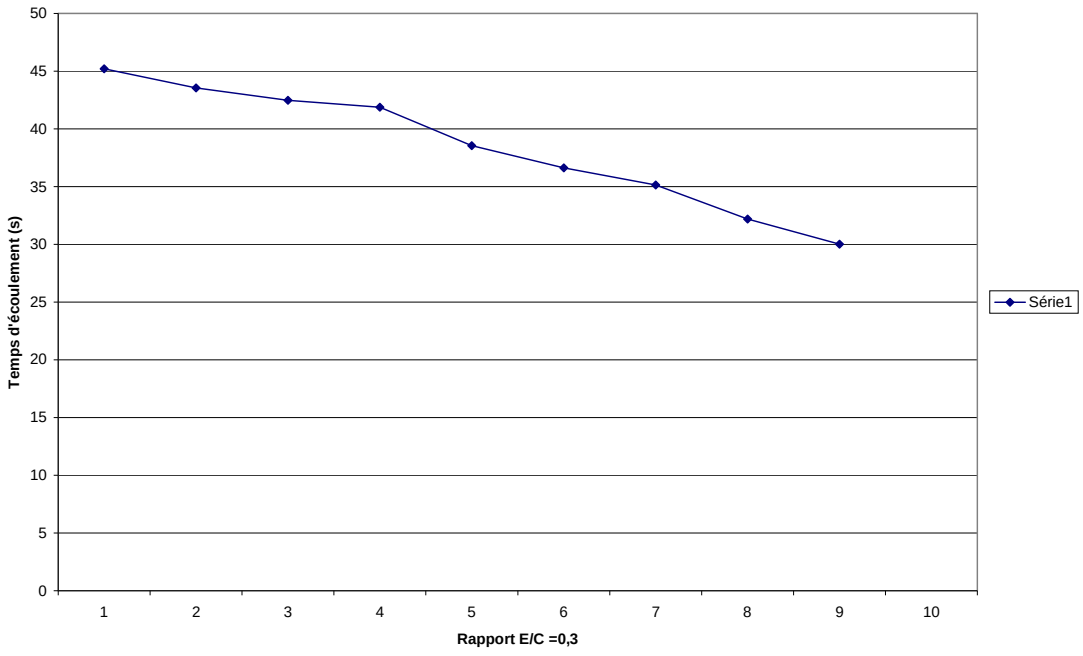


Figure B-9- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 10% addition laitier et avec fluidifiant.

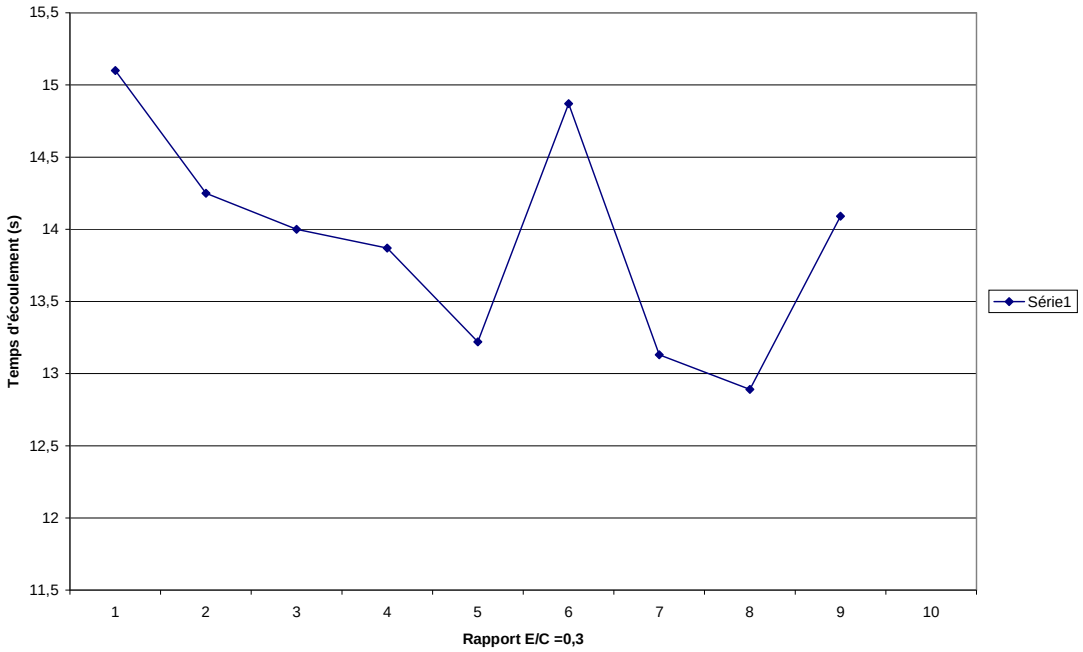


Figure B-10- Le rapport E/Len fonction de temps d'écoulement des coulis avec 15% addition laitier et avec fluidifiant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] **R. KETTAB**. «Elaboration d'un béton a hautes performances». Ecole National Polytechnique d'Alger (ENP), 1er Colloque Maghrébin en Génie Civil.

[02] **P-CLAUDE. AITCIN**. « Bétons haute performance». Edition Eyrolles, Janvier 2001, INSB2-212-01323-X. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

[03] **Pierre- Claude AITCIN,** «La technologique des bétons à très haute résistance en Amérique de Nord», 1987, 20,180-189. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

[04] **CHAFI Nardjes.** «Matrice cimentaire Renforcée des Fibres; Valorisation des sous produits (Polstyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois) » ; Université Mentouri- Constantine Thése de magister, Mars 2005**.**

[05] **Mehmed fouzi AZI.** «Caractérisation de nouveaux matériaux de construction béton à hautes performance et très hautes performance», Thèse de magistère, 2006**.**

[06] **Mladenka SANC – CORIC.** «Contribution des agents colloïdaux l'hydratation du ciment», Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Sherbrooke (Québec) Canada, Novembre 1997.

[07] **ADAM M.NEVILLE.** «Propriétés des bétons», CRIB, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton Sherbrooke- Laval, édition Eyrolles61, Bld Saint-Germain 75240 Paris Cedex05.

[08] **Julie arsenault.** «Étude des mécanismes de transport des ions chlore dans le béton en vue de la mise au point d'un essai de migration» du grade de Philosophie Doctoral (Ph-D.) présentée à la Faculté des Etudes Supérieures de 1' Université Laval et a l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse octobre 1999.

[09] **F- benboudjema.** «Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations bi axiales». Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires année 2002.

[10] **Journée d'information «** ciments – bétons – adjuvants » organisée par : – granitex année 2004.

[11] **E. KADRI, E. GHORBEL.** «Privision de la résistance en compréssion des BHP avec fumée de silice», Université de Cergy-Pontoise, Neunille sur Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France.

[12] **Aissa asroun, Mohamed Bachir Bouiadjra, Habib Trouzine.** «influnce des ajoutes cimentaires sur le comportement des bétons», Laboratoire de Matériaux et Hydrologie, Université Djillali Liables, BP89. Sidi Bel-Abbès 22000. Algérie.

[13] **Jacquues Baron; et Jean- Pierre OLLIVER.** «les bétons bases et donnée pour leur formulation», Edition Eyrolles 61, Bld Saint-Germain 75240 Pais Cedex.

[14] **Ali BOUACIDA Loucif.** «Effet de la qualité de ciment sur les propriétés mécaniques du béton»; Centre Universitaire de Tebassa, Thése de magister.

[15] **GAHER HAIFA.** «Analyse de résistance à la traction et retrait de béton à haute performance». Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 04 Décembre 2004.

[16] **G. DREUX, J. FESTA.** «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8eme Edition, Eyrolles, Paris, 1998.

[17] **Chinje Melo, U. et Billong, N.** «activité pouzzolaniques des déchets de briques et tuiles cuites», Africain Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp. 92 – 100.

[18] **C. KIRPACH Directeur adjoint Ciments Luxembourgeois S.A, Séminaire.** «BETON 2001: Journée d'information technique 23 novembre 2001»; Les nouvelles normes européennes du ciment

[19] **KHELIFA Riçal.** «Influence des ciment à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons», Université Mentouri- Constantine thèse de magistère**,** 11/07/2001**.**

[20] **Emmanuel T. Berger.** «Le volcanisme de Thueyts», http://www.Additions minéraux pouzzolane.fr ; 09/05/2005.

[21] **Mehamed Nacer Guettache.** «Contrubition à la valorisation des laitiers de haut fourneau D'EL Hadjar dans le domaine de la construction –Caracterisation des matériaux élabores», Université Mentouri- Constantine thèse de doctorat, 28/04/2002.

[22] **Menadi SOUAD.** «Valorisation du laitier siderurgique de complexe D'EL HADJAR étude du comportement mécanique du béton de laitier»; Université de Annaba, Thése de Magistèr.

[23] **Yanéric Roussel.** «Béton auto plaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton», université de Sherbrooke Faculté de Génie département de Génie Civil; Sherbrooke (Québec), CANADA, Mémoire e maîtrise es sciences appliquée Janvier 2000.

[24] **F- Gabrysiak.** «Technologie du béton», Groupement belge du béton asbl Rue volta 8, 1050 Bruxelles, Site Web : http://wwww.groupementbeton.be

[25] **Dossier technique de la société.** «GRANITEX-NP, Oued Smar, Alger».

[26] **François de Larrard.** «CONSTRUIRE EN BETON l'essentiel sur les matériaux», collection du laboratoire central des Ponts et chaussées, ISBN2-85978-366-0, 2002**.**

[27] **Salaheddin BENSEBTI.** «Caractérisation de matériaux a base de matrice cimentaire de la région de Constantine; formulation- Rhéologies- Résistance», Université de Constantine, thèse de magistère.

[28] **M. DJEZZAR, K.EZZIANE, A.KADRI.** «Evaluation pratique de la compatibilité C/SP dans les BHP», 1er Colloque Magrébin en Génie Civil, Biskra, les 16 et 17 Nouvember1998**.**

[29] **OSKAR ESPING.** «Rheology of Cementition Materials- Effects of geometrical prpertier of filler and fine aggregatem», thesis for degree of licentiate of engineering, Chalmers university of technology göteborg, Sweden 2004**.**

[30] **Granitexe.** « Recueil des notions technique» Edition 2006**.**

[31] **Yves MALIER.** «Les bétons à hautes performances ; Caractérisation, durabilité, application, école française du béton», Presses Ponts et chaussées.

[32] **David Lozach, Amprincipe.** «Les bétons aux nouvelles performances», Edition octobre2006 Paris R.C.S. Paris B 389 103 805**.**

[33] **Les carnets de L'EFB.** «Actes du colooque du béton, révolution, archétecteure», des 26 à 27 Novembre 1999.

[34] **Collection Technique B90G.** «Des bétons courants vers les béton aux nouvelles performances», cimbéton cahier des modules de conférence d'architecture pour les écoles centre d'information sur le ciment et ses applications.

[35] **Matériaux- Elaboration.** «Propriétés mécaniques et caractérisation ultrasonore», http://www.infociment.fr.

[36] **P.CLASTRES, P. ESCAFFIT.** «Travaux pratiques de mortiers et béton 3ème année POIC», institut national des sciences appliquées Toulouse ; Département STPI ; INSA, Cahier de TP, 2007.

[37] **Mohamed Sadok Hdriche.** «Modélisation du comportement du béton Autoplaçant : effet de la composition», université de Sherbrooke Faculté de Génie département de Génie Civil; Sherbrooke (Québec), CANADA Décembre 1998, Mémoire e maîtrise es sciences appliquée.

[38] **J. Perchat; J. Roux,** «Pratique du B.A.E.L, Coure avec exercice corrigés», Deuxième édition.

[39] **Norman F. MacLeod, ing** «synthèse des données sur l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel- dégel et aux produits chimiques de déglaçage», Plan d'action 2000 du gouvernement du Canada pour le changement climatique Canada, Mars 2005.

[40] **R. DUPAIN, R. LANCHON, J. C. Saint- ARROMAN.** «Granulats, Sols, Ciments et Bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire» Édition CASTEILLA, Paris, Mai 1995.

[41] **R. Morin; G. Haddad; P-C Aitcin.** «Des structure des BHP sans fissure», http://www.usherb.ca/CENTRES/crib/.

[42] **Fiche Technique,** «ENG. Laboratoire Central», site Web http://www.eng-sap.dz.